TK5742
.V342
MIT LIBRARIES
3 9080 01930 0620

Digitized by the Internet Archive
in 2023 with funding from
Amateur Digital Radio Communications, Grant 151

https://archive.org/details/notionsgenerales00valb

NOTIONS GÉNÉRALES

SUR

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

MASS. INSTITUTE
OF
TECHNOLOGY
28 OCT 19
LIBRARY

NOTIONS GÉNÉRALES

SUR

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

PAR

R. DE VALBREUZE
Ancien Officier du Génie,
Ingénieur-Électricien.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF PHYSICS

PARIS
ÉDITÉ PAR "*L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE*"
40, RUE DES ÉCOLES, 40

1907

TK5762
.V342

PREFACE

Au cours d'une série de conférences sur la Télégraphie sans fil, nous avons réussi à faire comprendre dans tout leur ensemble, à des auditeurs qui n'étaient aucunement préparés à de telles études, les phénomènes généraux en jeu dans la transmission de l'énergie par ondes électromagnétiques et les lois auxquelles obéissent ces phénomènes. Le puissant intérêt que présentent ces questions, et le désir maintes fois formulé par différentes personnes de pouvoir acquérir des notions exactes sur la Télégraphie sans fil, nous ont déterminé à rédiger, sous forme d'un petit livre, le contenu de nos conférences.

Cet ouvrage, que nous présentons au Public dans l'espoir de lui rendre service, peut être lu avec profit par tout le monde : il suppose seulement une connaissance rudimentaire des lois principales de la Physique et ne contient aucun développement mathématique. Néanmoins, ce n'est pas ce qu'on appelle un livre de vulgarisation, et il peut être utile à bon nombre d'ingénieurs, voire même de spécialistes, car il indique les résultats des études théoriques et expérimentales les plus récentes, grâce auxquelles la Télégraphie sans fil a pu progresser vigoureusement dans ces deux dernières années.

Afin de bien faire comprendre les phénomènes sur lesquels repose la transmission de signaux au moyen d'ondes électromagnétiques, nous ne nous sommes pas bornés simplement à une étude détaillée de la Télégraphie sans fil. Prenant la question à un tout autre point de vue, nous avons d'abord embrassé dans leur ensemble un certain nombre de phénomènes généraux de la Physique, et, en particulier, ceux qui ont trait à la radiation de l'Énergie. Ce n'est qu'après cette étude générale, et après

74141

avoir bien fait saisir au lecteur l'identité des radiations électriques avec les radiations lumineuses, que nous avons été conduit, par une suite toute naturelle, à montrer l'utilisation de l'une des formes d'énergie rayonnante, la radiation électrique, pour la transmission de signaux à travers l'espace. Ensuite, nous avons expliqué et développé les notions fondamentales de l'Électrotechnique, dont la connaissance est nécessaire pour l'étude des circuits oscillants, puis, après avoir décrit le mécanisme de la production des oscillations électriques et les moyens employés pour les engendrer, nous sommes arrivés à l'étude de la Télégraphie sans fil. Là, nous avons rappelé les expériences du début, décrit les principales méthodes employées pour la transmission et la réception des signaux, expliqué les phénomènes en jeu dans les antennes et les circuits oscillants auxquels elles sont accouplées, et passé en revue les progrès réalisés au point de vue théorique et au point de vue pratique. Enfin, nous avons mentionné les principaux systèmes adoptés pour l'échange des communications radiotélégraphiques, et nous avons donné la description de quelques puissantes stations récemment érigées pour les transmissions à grande distance.

En terminant, nous tenons à rappeler que ce livre a un caractère tout à fait général : son but n'est pas d'énumérer et de décrire les nombreux appareils construits ou proposés jusqu'à ce jour, mais de donner une idée exacte des phénomènes sur lesquels repose la Télégraphie sans fil et des méthodes mises en jeu pour l'émission et la réception des signaux. Comme tel, il s'adresse à tous ceux qui désirent s'instruire et développer leur esprit en se tenant au courant des progrès de la Science. Nous souhaitons que sa lecture éveille chez beaucoup d'indifférents le goût de l'étude de ces intéressantes questions.

Paris, Avril 1907.

NOTIONS GENERALES

SUR

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

CHAPITRE PREMIER

MOUVEMENT VIBRATOIRE ET RAYONNEMENT

Les actions électriques et magnétiques sont dues à un mouvement vibratoire propagé par un certain milieu : il en est de même des phénomènes de radiation lumineuse, chimique et calorifique. Le milieu qui vibre et par l'intermédiaire duquel se propagent les vibrations est nommé éther : on suppose qu'il existe partout, dans l'espace interplanétaire, dans le vide, et au sein de tous les corps, solides, liquides ou gazeux. Ces notions vont être expliquées et étudiées en détail dans ce chapitre.

Mouvement vibratoire.

On dit qu'un point déterminé effectue un *mouvement vibratoire* quand il se déplace, sur une courbe ou sur une droite, de part et d'autre d'une position moyenne.

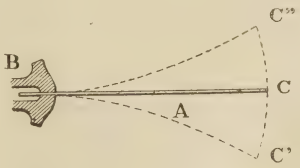


Fig. 1.

Un exemple mécanique fera comprendre cette définition. Considérons l'une des branches d'un diapason, ou, plus simplement, prenons une lame plate d'acier A un peu raide et fixons l'une de ses extrémités B dans un étau. Écartons de sa position normale l'autre extrémité C de cette lame et amenons-la en C′ par

exemple, puis abandonnons-la brusquement. La lame se met à vibrer : l'extrémité libre revient vers sa position normale C qu'elle dépasse pour aller jusqu'en C″ ; là, elle s'arrête, puis retourne vers la position C qu'elle dépasse à nouveau, etc. Si le mouvement de la lame ne rencontrait aucune résistance, telle que celle due au frottement de l'air, les vibrations pourraient continuer indéfiniment ; en pratique, dans le cas dont il s'agit, elles vont en s'éteignant peu à peu et l'on dit que le *mouvement* est *amorti*. Fixons notre attention sur un point de l'extrémité C de la lame : pendant les vibrations de celle-ci, ce point est animé d'un *mouvement vibratoire* et décrit la courbe C′ C″ qui, pour une longueur suffisante BC de la lame, peut être assimilée à une droite.

Le mouvement vibratoire du point considéré est caractérisé par le fait que la vitesse de déplacement de ce point est variable suivant les différentes positions qu'il occupe. En effet, la vitesse est nulle en C′ et va en croissant peu à peu jusqu'en C ; au delà du point C, l'élasticité de la lame agit pour ralentir le mouvement et la vitesse va en diminuant jusqu'au point C″ où elle s'annule. Ensuite le mouvement se produit en sens inverse, et la vitesse va en croissant jusqu'en C, pour décroître ensuite, etc. On a donné le nom de *mouvement vibratoire harmonique* à ce genre de mouvement vibratoire, pour lequel la vitesse du point qui vibre est maxima au moment du passage à la position moyenne, et va en décroissant de part et d'autre de cette position.

On appelle **fréquence** du mouvement vibratoire le *nombre de vibrations complètes* par seconde : par vibration ou oscillation complète, on entend la vibration totale de part et d'autre de la position moyenne, et l'on compte comme demi-vibration ou demi-oscillation le mouvement, aller et retour, qui a lieu d'un seul côté de la position moyenne.

On appelle **période** du mouvement vibratoire la *durée d'une vibration ou oscillation complète* ; il est facile de voir que le nombre qui exprime la période est l'inverse de celui qui exprime la fréquence : par exemple, s'il y a 1 000 vibrations par seconde (fréquence 1 000), la durée d'une vibration est de 1/1 000 seconde (période 1/1 000).

On appelle **amplitude** du mouvement vibratoire la *distance d'une position extrême* du point *par rapport à la position moyenne* (CC′ ou CC″ par exemple), ou, autrement dit, la grandeur d'une demi-vibration ou demi-oscillation. On voit immédiatement que, si le mouvement est amorti, comme dans l'exemple indiqué, l'amplitude de chaque demi-vibration est plus petite que l'amplitude de la demi-vibration précédente ; on dit que l'amplitude du mouvement va en décroissant, et cette décroissance est déterminée par un certain facteur, dit *facteur d'amortissement,* qui dépend du rapport de l'amplitude d'une demi-oscillation à celle de la demi-oscillation précédente. Nous pourrions, en employant un procédé quelconque, par exemple en faisant agir sur la lame une force périodique convenable, empêcher les oscillations d'aller en s'éteignant et faire en sorte que leur amplitude conserve toujours la même valeur : le mouvement vibratoire serait alors un mouvement entretenu. Enfin nous pourrions aussi, par l'application d'une force périodique convenable, faire en sorte que l'amplitude des oscillations aille en croissant : il sera question de ce cas dans le chapitre relatif à la Résonance.

Enfin, on appelle **phase** du mouvement vibratoire une *grandeur proportionnelle au rapport du temps t* écoulé depuis le passage du point par sa position moyenne *à la durée ou période* T *de la vibration*. On conçoit sans peine que, connaissant la phase, la période et la loi de variation du mouvement, on puisse en déduire la position du point à un instant t quelconque [1].

L'exemple mécanique qui précède nous a permis de nous rendre compte de ce qu'on appelle le mouvement vibratoire harmonique d'un point. Ce point peut représenter une particule d'un corps matériel quelconque, solide, liquide ou gazeux

---

[1] On démontre mathématiquement que, dans le mouvement vibratoire harmonique, la distance d qui sépare le point de sa position moyenne au bout du temps t est liée à l'amplitude a et à la période T par la formule

$$d = a \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

π étant le rapport de la longueur d'une circonférence à son diamètre (3,1416). La phase est égale à $\frac{2\pi}{T} t$.

qui, sous l'action de certaines forces, effectue des vibrations, amorties ou non amorties. Il peut aussi représenter une particule d'un milieu particulier, nommé éther, dont il va être question.

L'éther.

L'étude de la lumière, et des différents phénomènes qui s'y rattachent, a conduit Huygens à formuler, depuis plus de deux siècles, l'hypothèse que la propagation des rayons lumineux est due à des vibrations d'un milieu particulier qu'il a appelé l'éther. Toutes les découvertes successives de la science ont confirmé cette manière de voir, et l'existence de l'éther est devenue presque certaine. Il n'y a pas lieu de s'étonner de ce que l'éther soit répandu au sein de ce que nous appelons la matière (corps solides, liquides ou gazeux) puisque celle-ci est formée d'une agglomération d'atomes entre lesquels existent d'innombrables intervalles ou interstices, et que, d'après les théories les plus récentes, les atomes eux-mêmes semblent constitués par un assemblage de petits centres portant chacun une charge électrique (électrons). Les intervalles ou interstices sont de dimensions beaucoup trop faibles pour pouvoir être perçus par notre œil, même avec un microscope, de même que les intervalles existant entre les hommes d'une troupe ne peuvent être perçus par un observateur placé dans un ballon à une certaine hauteur.

L'éther est donc un agent répandu dans tout l'univers, et les phénomènes lumineux (y compris les radiations chimiques et calorifiques, comme nous le verrons plus loin), ainsi que les phénomènes électriques ou magnétiques, consistent, soit en une vibration (effets de propagation, ou effets dynamiques), soit en une déformation (effets statiques) de l'éther, cette vibration ou cette déformation étant produite par l'action d'une cause extérieure. La constitution réelle de l'éther n'est pas connue, mais certaines des propriétés principales de ce milieu ont pu être déterminées d'après les lois auxquelles obéissent les phénomènes lumineux ou électriques. Nous allons voir comment

les vibrations produites par une cause extérieure (source lumineuse, par exemple) peuvent se propager dans l'éther et donner lieu à une transmission de l'énergie.

Rayonnement.

Supposons que l'éther soit formé d'un assemblage de particules qui, en temps normal, se tiennent toutes en équilibre sous l'action des forces mutuelles qu'elles exercent les unes sur les autres. Si l'une des particules, que, pour plus de commodité, nous appellerons dans la suite particule initiale, est écartée de sa position d'équilibre par l'action d'une cause extérieure, l'équilibre des forces mutuelles est rompu et les particules voisines de la particule initiale se mettent en mouvement pour chercher une nouvelle position d'équilibre. A leur tour, les particules voisines de celles qui se déplacent vont se mettre en mouvement, puis il en sera de même des suivantes, etc. : on suppose que le mouvement de chaque particule est de même nature que le mouvement de la particule voisine qui lui a donné naissance. Cette transmission de proche en proche, ou propagation du mouvement imprimé à la particule initiale, constitue ce qu'on appelle le *rayonnement,* ou la *radiation.* Il est évident que cette propagation a lieu dans toutes les directions autour de la particule initiale, toutes les particules qui entourent celle-ci prenant part au mouvement.

Supposons que le mouvement imprimé à la particule initiale *c,* située primitivement en C (fig. 2), soit un mouvement vibratoire harmonique de période T dirigé suivant la droite C′C″ et ayant une amplitude constante CC′. Considérons l'une des directions CA suivant lesquelles le mouvement se propage de proche en proche. Les *vibrations* sont dites *transversales* parce qu'elles sont perpendiculaires à la direction de propagation. Soient *d* la particule voisine de *c* dans cette direction, *e* la particule voisine de *d, f* la particule voisine de *e*, etc.

La particule initiale *c* se mettant en mouvement, *d* va suivre peu après, puis *e,* puis *f*, puis..., etc. Quand la particule *c* est parvenue à la position C′ qui marque le terme de son dépla-

cement dans la direction CC′, la particule *d*, qui a commencé son mouvement un peu après elle, n'est encore qu'en D_1 ; la

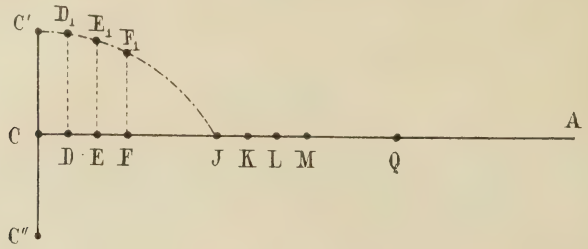


Fig. 2.

particule *e* n'est parvenue qu'en E_1, la particule *f* a atteint la position F_1..., etc. : la particule *j*, qui est au point J, n'a pas encore commencé son mouvement ; il en est de même de toutes les particules situées à droite de J dans la direction JA. A ce moment, le temps *t* écoulé depuis le début du mouvement vibratoire de la particule *c* est égal à un quart de période, ou à T/4, puisque la particule *c* a effectué la moitié d'une demi-oscillation, ou un quart d'oscillation complète.

Après avoir atteint la position C′, la particule *c* va redescendre vers la position C : la particule *d* continue son mouvement ascendant pour atteindre la position qui correspond à l'amplitude maxima du mouvement vibratoire (égale par hypothèse à l'amplitude CC′) : de même les particules *e*, *f*..., etc. continuent leur mouvement ascendant, et la particule *j* commence son mouvement. Un instant après, *d*, ayant atteint son plus grand déplacement, commence à redescendre vers la position D, tandis que *e*, *f*... *j* continuent à se mouvoir dans le sens primitif, pour atteindre leurs positions extrêmes : la particule *k*, située au point K, se met en mouvement. Tour à tour, les particules *e*, *f*,... *j* atteignent chacune leur position extrême, puis redescendent, leur mouvement changeant de sens, tandis qu'à leur tour les particules *l*, *m*... situées primitivement aux points L, M... commencent leur mouvement.

Considérons le moment où la particule *j* atteint sa position extrême J_2 (fig. 3). Nous avons vu plus haut que la particule *j* commençait son mouvement au bout d'un temps $t = T/4$:

il lui faut, comme cela a été expliqué, un quart de période (T/4) pour atteindre sa position extrême. A ce moment, il s'est donc écoulé, depuis le début du mouvement de la parti-

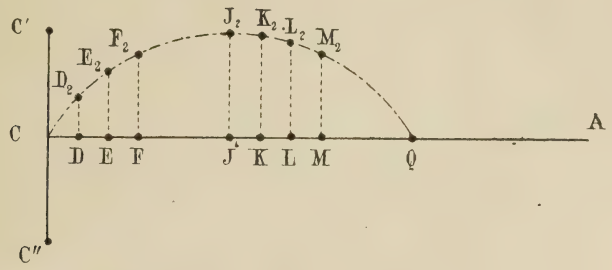


Fig. 3.

cule *c*, un intervalle de temps égal à deux quarts de période (T/4 + T/4) ou une demi-période ; par conséquent, la particule *c* repasse par sa position moyenne C après avoir effectué une demi-vibration ou oscillation. Les particules *d, e, f*... descendent aussi vers leurs positions moyennes D, E, F ; elles sont en D_2, E_2 et F_2... ; les particules *k, l, m*... sont en K_2, L_2, M_2... et continuent leur mouvement ascendant pour atteindre à leur tour leurs positions extrêmes ; la particule *q*, située en Q, n'a pas encore bougé, mais elle va commencer son mouvement.

Après cet intervalle de temps égal à une demi-période, la particule *c* dépasse sa position moyenne C et se dirige vers C'':

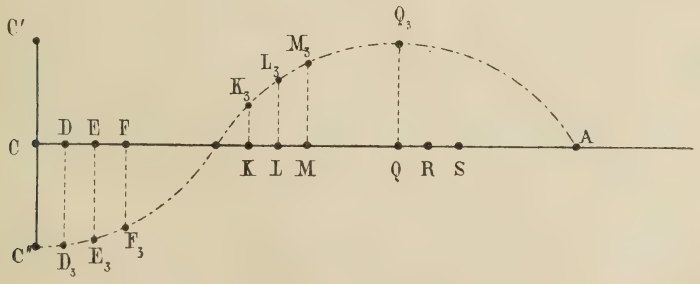


Fig. 4.

il en est de même, tour à tour, des particules *d, e, f*... Au bout d'un nouveau quart de période, c'est-à-dire trois quarts de période après le début du mouvement de la particule *c*, cette

particule atteint le point C″ (fig. 4) ; les particules *d*, *e*, *f*... ont atteint les positions D_3, E_3, F_3... et continuent leur mouvement vers le bas. La particule *j* se trouve à sa position moyenne J puisque, un quart de période auparavant, elle était à sa position extrême J_2. Les particules *k*, *l*, *m*... se dirigent vers leurs positions moyennes K, L, M... et sont en K_3, L_3, M_3,... : quant à la particule *q*, elle se trouve à sa position extrême Q_3, puisqu'elle a commencé son mouvement au bout d'une demi-période et qu'il s'est écoulé depuis lors un temps égal à un quart de période. Enfin, la particule *a*, située en A, n'a pas encore bougé, mais va commencer son mouvement.

Après avoir atteint la position C″, la particule *c* remonte vers sa position moyenne C, les particules *d*, *e*, *f*... continuent leur mouvement pour atteindre leurs positions extrêmes inférieures ; la particule *j* se déplace vers le bas ; les particules *k*, *l*, *m*... *q* redescendent ; les particules situées à droite de *q* continuent

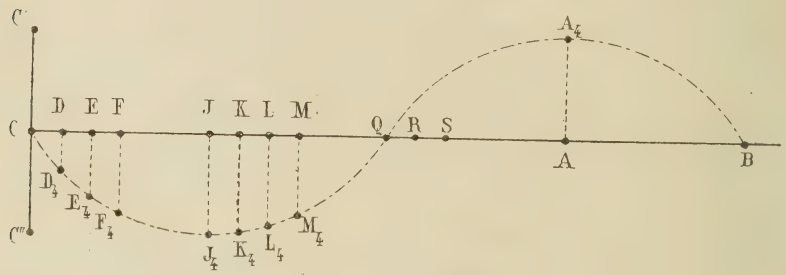


Fig. 5.

leur mouvement vers le haut pour atteindre à leur tour leurs positions extrêmes supérieures ; la particule *a* commence son mouvement ; les particules qui sont à sa droite n'ont pas encore bougé mais vont commencer tour à tour leur mouvement. Au bout d'un quart de période, c'est-à-dire quatre quarts de période, ou une période entière T après le début du mouvement (fig. 5), *c* est revenue en C ; *d*, *e*, *f*... sont en D_4, E_4, F_4... etc., et se dirigent vers D, E, F : *j* a atteint sa position extrême inférieure J_4 ; *k*, *l*, *m*... sont en K_4, L_4, M_4... et continuent leur mouvement vers le bas ; *q* est revenue en Q après une demi-oscillation et va se déplacer vers le bas ; *a* a atteint sa position extrême supérieure A_4 et va redescendre ; les particules placées à sa

droite continuent leur mouvement vers le haut ; la particule *b*, située en B, n'a pas encore bougé, mais va commencer son mouvement.

A partir de ce point B, tout va se passer identiquement de la même manière qu'à partir du point C, à la différence près que le mouvement aura commencé une période plus tard. Au bout d'un nouvel intervalle de temps T, c'est-à-dire au bout d'un temps 2T après le commencement du phénomène, le mouvement aura progressé d'une longueur égale à 2 fois la longueur CB ; au bout d'un temps 3T, il atteindra une particule située à une distance 3CB du point C..., etc.

On voit que le mouvement vibratoire se propage, dans une direction donnée, sous forme d'une onde qui progresse peu à peu, comme l'onde que produit sur une surface liquide le choc d'une pierre tombant dans ce liquide. Les courbes tracées en trait-point sur les figures 2, 3, 4 et 5 donnent une idée de la propagation de cette onde.

On appelle **longueur d'onde** la *longueur dont a progressé le mouvement vibratoire pendant une période* T, ou le chemin parcouru par la tête de l'onde, c'est-à-dire la longueur CB. La longueur d'onde dépend de la *vitesse de propagation* du mouvement vibratoire dans l'éther : cette vitesse est d'environ 300 000 kilomètres par seconde dans l'éther libre [1]. Il est à remarquer que la vitesse de propagation est indépendante de la cause extérieure qui a provoqué le mouvement vibratoire de l'éther ; elle a la même valeur quand cette cause est due à des phénomènes lumineux ou à des phénomènes électriques.

En appelant v la vitesse de propagation et T la période de mouvement vibratoire d'une particule et λ la longueur d'onde, nous voyons que celle-ci est donnée par la formule

$$\lambda = vT.$$

Nous avons vu plus haut que la fréquence f du mouvement vibratoire (nombre de vibrations complètes par seconde) est

---

[1] C'est-à-dire dans l'espace, l'éther semblant posséder une densité un peu plus grande quand il est au sein de solides ou de liquides, et la vitesse de propagation étant, par suite, un peu plus faible.

égale à l'inverse de la période T : la longueur d'onde λ est donc liée à la fréquence par la formule

$$\lambda = v\left(\frac{1}{f}\right).$$

Par exemple, des vibrations de fréquence 1 000 000 (fréquemment employées en Télégraphie sans fil) ont une longueur d'onde de 300 mètres. Inversement, des vibrations ayant une longueur d'onde de 5 dix-millièmes de millimètre, par exemple (0,0005 millimètre) telles que les vibrations lumineuses, ont une fréquence de 600 000 000 000 000, ou 600 billions par seconde.

On voit, d'après les figures 4 et 5, que les déplacements de deux particules distantes d'une demi-longueur d'onde, par exemple des particules *d* et *r*, *e* et *s*, etc., sont toujours égaux et de sens contraire. *Les phases des mouvements vibratoires de deux particules distantes d'une demi-longueur d'onde sont donc toujours égales et opposées. Les phases des mouvements vibratoires de deux particules distantes d'une longueur d'onde sont toujours égales et concordantes*, puisque, à partir du point B, tout se passe de la même manière qu'à partir du point C.

CHAPITRE II

RADIATION CHIMIQUE, LUMINEUSE, CALORIFIQUE ET ÉLECTRIQUE

Le mouvement vibratoire de l'éther se manifeste sous forme de phénomènes très dissemblables suivant la longueur d'onde ou, ce qui revient au même, suivant la fréquence des vibrations. Ces phénomènes, que nous appellerons *phénomènes de radiation,* sont caractérisés par l'apparition d'effets chimiques, d'effets lumineux, d'effets calorifiques ou d'effets électriques et magnétiques. Les *effets chimiques* correspondent à la radiation caractérisée par les plus faibles longueurs d'onde (ou la plus grande fréquence des vibrations) : ces longueurs d'onde sont comprises à peu près entre 0,1 et 0,4 micron [1]. Les *effets lumineux* (accompagnés aussi, d'une façon plus ou moins marquée, d'effets chimiques et d'effets calorifiques) correspondent à la radiation caractérisée par des longueurs d'onde comprises à peu près entre 0,4 et 0,75 micron. Les *effets calorifiques* correspondent à la radiation caractérisée par des longueurs d'onde comprises entre 0,75 et 60 μ environ. Enfin les *effets électriques et magnétiques* correspondent à la radiation caractérisée par des longueurs d'onde comprises entre 4 millimètres (actuellement) et quelques kilomètres. Les vibrations correspondant à des longueurs d'onde comprises entre 60 μ (0,06 millimètre) et 4 millimètres nous échappent actuellement. Il y a lieu d'ajouter à cette énumération deux catégories de rayons dont la découverte est d'origine récente : ce sont les rayons Röntgen et les

---

[1] Le micron, que nous désignerons dans la suite par la lettre μ, est une unité ayant pour valeur un millième de millimètre : $1\ \mu = 0{,}001$ millimètre.

rayons γ du radium [1], dont la longueur d'onde s'abaisse jusqu'à un dix-millième de micron.

Rayons lumineux ; rayons chimiques et calorifiques.

La nature nous a doté d'un appareil optique particulier, nommé œil, qui, sous l'action d'un mouvement vibratoire dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,75 μ, c'est-à-dire sous l'action de vibrations dont la fréquence est comprise entre 750 et 400 billions par seconde, perçoit une certaine sensation que nous appelons la lumière.

Une vieille expérience de physique bien connue consiste à faire passer à travers un prisme en verre un faisceau de lumière blanche homogène. On constate alors, en plaçant un écran au delà du prisme, que le faisceau de lumière blanche homogène est décomposé en une bande de rayons lumineux de différentes couleurs rangées dans l'ordre suivant : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge. Cela tient à ce que les rayons qui donnent à notre rétine la sensation que nous nommons lumière blanche sont formés par la superposition de mouvements vibratoires de différentes longueurs d'onde, comprises entre 0,4 et 0,75 μ, ou, autrement dit, par la superposition d'un certain nombre de rayons simples correspondant chacun à des vibrations d'une fréquence donnée. L'indice de réfraction du verre du prisme ayant une valeur différente pour chacun des rayons simples qui constituent le rayon complexe, ce dernier se trouve décomposé en ses éléments constitutifs, et l'on voit apparaître une série de rayons qui donnent à notre rétine des sensations variables, comprises entre ce que nous appelons lumière violette et ce que nous appelons lumière rouge. A chaque mouvement vibratoire simple d'une longueur d'onde déterminée correspond une sensation, ou couleur, déterminée : le violet correspond à une longueur d'onde de 0,4 μ; le jaune correspond à la longueur d'onde de 0,54 μ ; le rouge correspond à la longueur d'onde de 0,75 μ.

---

[1] Le radium émet simultanément plusieurs sortes de rayons nettement distinctes, désignées par les lettres α, β, γ.

Les vibrations correspondant à des longueurs d'onde inférieures à 0,4 μ ou supérieures à 0,75 μ n'exercent aucune impression sur notre œil. Cependant on peut constater que, en deçà du violet, pour des longueurs d'onde comprises entre 0,1 et 0,4 μ, il existe des rayons invisibles, appelés ultra-violets, qui produisent des effets chimiques, faciles à déceler, par exemple au moyen d'une plaque photographique. De même, au delà du rouge, il existe encore des rayons invisibles, dont les longueurs d'onde s'étendent entre 0,75 et 60 μ, et qui produisent des effets calorifiques, faciles à déceler, par exemple au moyen d'un thermomètre recouvert de noir de fumée. Ces rayons sont appelés infra-rouges.

Il ne faut pas croire que les rayons chimiques, lumineux et calorifiques soient nettement distincts les uns des autres : ils forment toujours ensemble une radiation complexe et sont engendrés simultanément par tous les corps portés à l'incandescence [1]. D'ailleurs les rayons lumineux proprement dits (longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,75 μ) peuvent eux-mêmes produire, dans certains cas, des effets chimiques et des effets calorifiques.

Le soleil, formé de gaz et de vapeurs incandescents, est une puissante source lumineuse dont les radiations éclairent et chauffent la terre. Il était tout naturel que l'esprit des physiciens s'attachât à chercher les causes et les lois de ces radiations : c'est pourquoi la théorie des phénomènes lumineux et les lois de l'optique sont connues depuis un grand nombre d'années et nous sont, pour ainsi dire, devenues familières.

Rayons électriques.

Tandis que les lois auxquelles obéissent les phénomènes lu-

---

[1] L'énergie dépensée pour échauffer un corps met en vibration les molécules ou les atomes de ce corps. Plus la température à laquelle le corps est chauffé est élevée, et plus est grande la fréquence des vibrations, c'est-à-dire plus est courte la longueur d'onde des rayons émis. Aux températures inférieures à celle de l'incandescence, le corps émet seulement des rayons de grande longueur d'onde, c'est-à-dire des rayons calorifiques. A mesure que la température s'élève, il émet de plus en plus de rayons lumineux.

mineux étaient bien déterminées, celles auxquelles obéissent les phénomènes électriques l'étaient infiniment moins, et l'analogie entre ces deux sortes de phénomènes, quoique pressentie par quelques savants et, en particulier, par Maxwell, n'avait pu être démontrée expérimentalement. Il y a une vingtaine d'années, un physicien allemand, H. Hertz, réussit à produire, au moyen d'un appareil que nous étudierons dans la suite, des oscillations électriques susceptibles de communiquer à l'éther un mouvement vibratoire ayant une longueur d'onde de quelques mètres. Sur les *rayons électriques* ainsi engendrés, Hertz renouvela, avec des appareils appropriés, les expériences fondamentales de l'optique (réflexion, réfraction, etc.) et constata que les rayons électriques obéissent exactement aux mêmes lois que les rayons lumineux. L'identité des deux mouvements vibratoires était ainsi nettement démontrée : la théorie électromagnétique de la lumière, énoncée par Maxwell, recevait une éclatante confirmation, et la physique générale franchissait un grand pas.

Pour diminuer l'intervalle séparant les rayons électriques des rayons calorifiques, Hertz et différents expérimentateurs, parmi lesquels il convient de citer M. Righi, s'attachèrent à diminuer autant que possible la longueur d'onde du mouvement vibratoire ainsi produit, en augmentant la fréquence des vibrations électriques. On est parvenu, ainsi, par des moyens appropriés, à produire des ondes de 4 millimètres environ de longueur d'onde, c'est-à-dire des vibrations électriques ayant une fréquence de 75 000 000 000 ou 75 milliards par seconde. Il n'y a aucune impossibilité à ce que l'on obtienne des ondes encore plus courtes : on n'est limité dans cette voie que par des difficultés d'ordre mécanique et par la sensibilité des appareils employés pour déceler la présence des ondes électriques.

Énergie rayonnante.

On appelle souvent *énergie rayonnante* l'énergie propagée par rayonnement, sans spécifier quels sont les effets produits par le mouvement vibratoire de l'éther. Comme nous l'avons

vu, la nature de ces effets dépend uniquement de la longueur d'onde des rayons, ou de la fréquence des vibrations, et, quels que soient ces effets, les ondes sont toujours de nature électrique ou, pour mieux dire, électromagnétique.

Les mouvements vibratoires que nous connaissons correspondent à des longueurs d'onde comprises entre 0,0001 μ et 60 μ, puis entre 4 millimètres et l'infini, c'est-à-dire qu'ils ont des fréquences comprises entre 3 trillions et 5 billions, puis entre 75 milliards et zéro. Notre œil est impressionné par les rayons de longueurs d'onde de 0,4 à 0,75 μ, c'est-à-dire par des fréquences de 750 à 400 billions par seconde : c'est là une portion extrêmement faible de la gamme totale des vibrations. Quant aux mouvements vibratoires de longueurs d'onde comprises entre 60 μ (onde calorifique la plus longue) et 4 millimètres (onde électrique la plus courte), nous ne connaissons pas, à l'heure actuelle, leurs propriétés particulières, mais, suivant toute probabilité, ils sont semblables aux rayons électriques. D'ailleurs MM. Rubens et Aschkinass ont pu isoler, par réflexions successives, des ondes calorifiques de 61 μ de longueur et ont constaté que ces ondes ressemblent beaucoup plus aux ondes électriques qu'aux ondes lumineuses.

Les mouvements vibratoires de l'éther se propagent non seulement dans l'espace libre, mais encore dans les corps solides, liquides ou gazeux, puisque ceux-ci contiennent de l'éther. Dans certains de ces corps, ils subissent une absorption très considérable, parfois même une transformation, et sont ainsi arrêtés. Dans d'autres, au contraire, ils ne subissent qu'une absorption très faible et semblent traverser librement ces corps. C'est ainsi que les corps opaques arrêtent les rayons lumineux, tandis que les corps transparents, comme le verre, les laissent passer avec une très faible absorption ; le verre arrête, par contre, les rayons ultra-violets, que le quartz laisse passer. Les rayons électriques sont arrêtés par les métaux et, en général, par les corps bons conducteurs de l'électricité ; ils traversent librement, au contraire, les isolants, tels que le verre, le bois, la pierre, etc. On peut résumer les propriétés des corps matériels par rapport aux mouvements vibratoires de l'éther en disant que chacun d'eux absorbe fortement les

rayons de certaines longueurs d'onde et faiblement les rayons d'autres longueurs d'onde. En outre, quelques corps ont la propriété de transformer les rayons d'une longueur d'onde donnée en rayons d'une longueur d'onde un peu différente : ces corps sont dits fluorescents : la rhodamine en est un exemple, et transforme les rayons situés dans la partie violette du spectre en rayons situés dans la partie rouge.

Transmission de l'énergie par le mouvement vibratoire.

D'après ce qui précède, on conçoit facilement que le mouvement vibratoire de l'éther puisse être utilisé dans la télégraphie sans fil pour transmettre, au moyen de rayons électriques, des signaux déterminés, de même que la télégraphie optique utilise pour cela des rayons lumineux. Il existe une différence, non de principe, mais d'application, entre ces deux systèmes de télégraphie à distance : c'est que, dans la télégraphie optique, on peut concentrer les rayons lumineux en un faisceau parallèle au moyen d'un système de miroirs et de lentilles, tandis qu'en télégraphie sans fil, on ne peut employer le même procédé, par suite des dimensions énormes qu'il faudrait donner aux appareils : en effet, les longueurs d'onde employées en télégraphie sans fil sont environ cinq cent millions de fois plus grandes que les longueurs d'onde des rayons lumineux, et les dimensions des appareils devraient être accrues à peu près dans les mêmes proportions. Un poste transmetteur émet donc des rayons électriques dans toutes les directions. Au poste récepteur, on emploie un détecteur d'ondes électriques, jouant, vis-à-vis de celles-ci, le rôle que jouent, vis-à-vis des ondes lumineuses, les cellules et les bâtonnets de notre œil. Les rayons électriques ont, sur les rayons lumineux, l'avantage d'être beaucoup plus difficilement absorbés parce que leur longueur d'onde est beaucoup plus grande.

CHAPITRE III [1]

PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES, ÉLECTRODYNAMIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Avant d'étudier la façon dont on produit les oscillations électriques, il nous faut passer rapidement en revue les principales notions relatives à l'état électrique d'un corps (phénomènes statiques) ou à la production et aux effets du courant électrique (phénomènes dynamiques et électromagnétiques).

Potentiel.

L'état électrique d'un corps est caractérisé par une fonction mathématique qu'on appelle le potentiel. Cette fonction représente en quelque sorte, au point de vue électrique, l'énergie de position ou *énergie potentielle* que possède le corps.

Pour comprendre ce dont il s'agit, considérons un corps pesant placé à une certaine hauteur, sur une table par exemple. Si l'on enlève brusquement la table, le corps tombe, et, dans sa chute, il est capable de produire un certain travail. Puisqu'il peut fournir du travail, c'est qu'il possédait une certaine énergie, dite énergie de position ou énergie potentielle : cette énergie était égale en valeur au travail qu'on avait dû dépenser pour soulever le corps et l'amener sur la table en luttant contre les forces de la pesanteur.

---

[1] Les chapitres III et IV, qui ne se rapportent pas directement à la Télégraphie sans fil, ont pour but de permettre, aux lecteurs qui n'ont aucune connaissance en Électricité, la compréhension de tous les phénomènes dont il sera question dans la suite. Ils contiennent les principales notions qu'il est nécessaire de posséder.

Au lieu d'une région de l'espace où s'exercent les forces de la pesanteur et où l'on envisage les propriétés d'un corps pesant, considérons maintenant une région de l'espace où s'exercent des forces électriques [1] et un corps portant lui-même une certaine charge d'électricité. Il est évident que, pour amener ce corps depuis un point situé en dehors du champ électrique jusqu'en un point situé dans ce champ, on devra développer un certain travail : en ce dernier point, le corps possédera donc une certaine énergie de position ou, pour employer le mot, il aura un certain potentiel. On voit, d'après ce qui vient d'être dit, que ce potentiel est égal au travail qu'effectueraient les forces du champ électrique pour déplacer le corps depuis le point qu'il occupe dans le champ jusqu'à la limite de ce champ, travail égal en valeur au travail qu'il a fallu développer pour amener le corps de la limite du champ jusqu'au point qu'il occupe.

Le potentiel de la terre est pris comme point de comparaison et est supposé nul par définition : le potentiel d'un corps aura donc une valeur positive (+) ou négative (−) suivant qu'il sera supérieur ou inférieur au potentiel de la terre.

Certains appareils ou machines électriques, dont il sera question plus loin, permettent de produire entre deux points une différence de potentiel donnée.

Charge électrique.

Prenons un corps bon conducteur de l'électricité, une sphère métallique par exemple, et, au moyen d'une machine électrique, portons cette sphère à un certain potentiel A [2]. Nous pourrons constater facilement, par des méthodes dans le détail

---

[1] Une telle région de l'espace est appelée *champ électrique* : nous verrons plus loin comment il peut exister des champs électriques.

[2] Puisque la machine électrique permet de produire une certaine différence de potentiel, on pourra créer cette différence de potentiel entre la sphère et la terre, et, comme le potentiel de celle-ci est nul par définition, la sphère se trouvera portée à un certain potentiel dont la valeur sera égale à la valeur de la différence de potentiel produite par la machine.

desquelles il est inutile d'entrer, que, quand le potentiel de la sphère a une valeur A, cette sphère porte une charge d'électricité Q proportionnelle à A. On aura $Q = CA$: la constante de proportionnalité C s'appelle la *capacité électrique* de la sphère ; elle caractérise celle-ci au point de vue de certaines de ses propriétés électrostatiques. Tous les corps conducteurs isolés ont une certaine capacité électrique, en général très faible. Certains appareils particuliers, dans lesquels des surfaces métalliques sont placées à faible distance d'autres surfaces métalliques parallèles, présentent une grande capacité et réalisent ce qu'on appelle des *condensateurs*.

Condensateurs.

Prenons deux plaques métalliques isolées et plaçons-les à quelques millimètres l'une de l'autre, puis, en les reliant à une machine électrique, établissons entre elles une certaine différence de potentiel. Nous pouvons constater que le système formé par les deux plaques de métal et la lame d'air qui les sépare prend une certaine charge électrique [1] : cette charge électrique est due à une déformation (probablement de même nature qu'une déformation élastique) de l'éther compris entre les deux plaques [2]. Si maintenant, au lieu d'une lame d'air, nous introduisons entre les deux plaques une autre substance isolante, une lame de verre par exemple, nous constatons que la charge électrique prise par le système, pour la même différence de potentiel que précédemment et pour le même écartement des plaques, a augmenté d'une façon importante. Avec une lame de verre par exemple, la valeur de la charge électrique sera devenue 6 ou 7 fois plus grande. Cela prouve que la capacité du système a augmenté, et cette augmentation provient de ce que les déformations (élastiques) de l'éther inter-

---

(1) On pourra mettre cette charge en évidence en enlevant la machine électrique et en reliant les deux plaques à un appareil de mesure, à travers lequel le condensateur se déchargera.

(2) Au moment de la décharge du condensateur, l'éther revient à son état normal.

posé entre les plaques ne sont pas les mêmes pour les différents isolants au sein desquels se trouve l'éther. Les corps isolants, solides, liquides ou gazeux, peuvent seuls présenter de ces déformations de l'éther qu'ils contiennent : dans les corps bons conducteurs au contraire, il ne peut jamais y avoir de déformations permanentes.

En pratique, les condensateurs employés en télégraphie sans fil sont tous du type de la *bouteille de Leyde* : chacun d'eux consiste en un vase ou un tube en verre dont les surfaces intérieure et extérieure sont revêtues chacune d'une feuille métallique, nommée armature : on accouple ensemble un nombre plus ou moins grand de bouteilles de Leyde suivant que l'on veut obtenir une capacité plus ou moins considérable.

Décharge et courant électrique.

Considérons, comme précédemment, une sphère métallique A (fig. 6) que nous chargeons au potentiel A. Plaçons à une

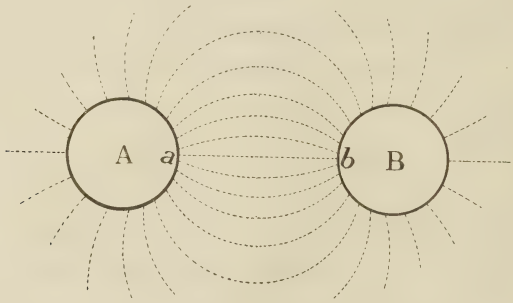


Fig. 6.

certaine distance de cette sphère A une seconde sphère B que nous chargeons au potentiel B. Il existe entre les deux sphères une *différence de potentiel* (A—B) dont la valeur est déterminée d'après les valeurs du potentiel A et du potentiel B. Sous l'effet de cette différence de potentiel (A—B), il se manifeste, entre les deux sphères, certaines *forces électriques*, dont la valeur est évi-

demment proportionnelle à la différence de potentiel (A—B) qui les crée. *La région de l'espace dans laquelle s'exercent des forces électriques dues à la présence des sphères chargées* A *et* B *s'appelle* **champ électrique.** La direction de ces forces électriques est caractérisée par certaines lignes imaginaires, nommées *lignes de force électriques* : celles-ci sont représentées en pointillé sur la figure 6.

L'intervalle entre les deux sphères A et B est supposé rempli par de l'air, ou par tout autre isolant gazeux, liquide ou solide. La plus petite épaisseur de cet isolant qui sépare les deux sphères est la distance *ab*. Si cette épaisseur *ab* est suffisante pour résister à l'action des forces électriques proportionnelles à la différence de potentiel (A—B), les deux sphères conservent leurs potentiels respectifs. Si, au contraire, l'épaisseur *ab* n'est pas suffisante pour résister à l'action des forces électriques, celles-ci produisent un percement ou une rupture violente de l'isolant, et une *étincelle* jaillit entre les points *a* et *b* : cette étincelle produit un certain travail, qui se manifeste par des effets lumineux et calorifiques ; ce travail est fourni au dépens de la charge des deux sphères. L'ensemble de ce phénomène est appelé *décharge électrique* : c'est lui qui donne lieu, lors des orages, à la production d'éclairs jaillissant entre deux nuages chargés à des potentiels inégaux par leur frottement contre les couches supérieures de l'atmosphère.

Après la décharge, on constate que les potentiels des deux sphères se sont égalisés, chacun d'eux prenant une valeur à peu près égale à la moyenne des potentiels A et B. Si, en particulier, les deux sphères étaient chargées à des potentiels égaux en valeur, mais de signe contraire, le potentiel de chacune d'elles est à peu près nul après la décharge.

Supposons maintenant que l'intervalle isolant compris entre les deux sphères chargées A et B soit suffisamment épais pour que la décharge ne puisse pas se produire, mais relions ces deux sphères l'une à l'autre par un fil bon conducteur. Nous pourrons constater qu'il se produit dans ce fil un certain phénomène dynamique, par lequel les potentiels des deux sphères tendent à s'égaliser comme dans le cas précédent. Ce phénomène dyna-

mique est appelé *courant électrique,* car il se présente sous la forme d'un flux d'électricité allant d'une sphère à l'autre : son passage se manifeste par des effets déterminés, tels que l'échauffement du fil conducteur qui, s'il est assez fin, peut être amené au blanc incandescent ou même être fondu.

Le courant électrique qui passe dans le fil reliant les deux sphères prend fin aussitôt que les potentiels de celles-ci se sont égalisés ; sa durée est extrêmement courte, et aucun phénomène électrique ne se manifeste plus entre les deux sphères A et B, puisqu'il n'existe plus entre elles aucune différence de potentiel.

Pour pouvoir produire, d'une façon permanente, un courant électrique dans un circuit conducteur [1], on a dû inventer des appareils ou des machines électriques capables de maintenir d'une façon permanente, entre deux points de ce circuit, une différence de potentiel déterminée. Cette différence de potentiel est due à une certaine force, dite *force électromotrice,* qu'engendre l'appareil ou la machine électrique. Tant que dure la force électromotrice, la différence de potentiel entre les deux points du circuit entre lesquels est intercalée la machine électrique donne naissance, dans ce circuit, à un courant électrique permanent. L'*intensité de ce courant est proportionnelle à la différence de potentiel qui lui donne naissance et est inversement proportionnelle à la résistance* que les différentes parties constitutives du circuit électrique opposent au passage du courant.

D'après les connaissances actuelles, il est très probable que le courant électrique dans un conducteur est dû à un déplacement ou transport de petites charges d'électricité, nommées électrons, qui sont supposées former les parties constitutives de tous les atomes matériels. Dans les corps bons conducteurs de l'électricité, les atomes auraient la propriété de pouvoir échanger de proche en proche leurs électrons, d'où résulterait le phénomène de propagation que l'on appelle courant électrique. Dans les corps mauvais conducteurs (isolants) au con-

---

[1] Comprenant, par exemple, des lampes électriques, des moteurs électriques, etc., reliés entre eux par des fils métalliques.

traire, de tels déplacements des électrons ne pourraient pas se produire.

Quoi qu'il en soit, nous avons vu que le courant électrique dans un conducteur a une intensité proportionnelle à la différence de potentiel qui l'engendre et inversement proportionnelle à la résistance qui s'oppose à son passage. Cette résistance, nommée *résistance électrique* du conducteur, *est proportionnelle à la longueur du conducteur et inversement proportionnelle à sa section et à sa conductibilité électrique*. Elle est analogue à la résistance qu'oppose un tuyau à la circulation d'un liquide, résistance qui dépend évidemment de la longueur du tuyau et de sa section.

Champ magnétique.

Les propriétés des aimants sont bien connues. Si l'on place une feuille de papier au-dessus d'un barreau aimanté et si l'on saupoudre celle-ci avec de la limaille de fer, on voit que les grains de limaille s'agglomèrent suivant certaines lignes en formant des chaînettes (fig. 7). Ces lignes sont dites *lignes de force*

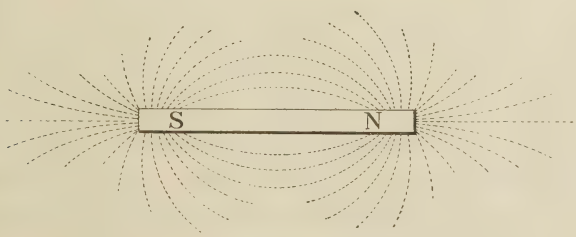


Fig. 7.

magnétiques : leur ensemble constitue un *flux magnétique* qui semble sortir de l'aimant par le pôle Nord pour y rentrer par le pôle Sud, les lignes de force s'étalant en éventail aux deux extrémités du barreau et se resserrant à l'intérieur de celui-ci, où elles semblent aller du pôle Sud au pôle Nord. *Toute région de l'espace dans laquelle il existe des lignes de force magnétiques est appelée* **champ magnétique** : le champ magnétique est

caractérisé par sa direction, d'une part, et par son intensité, d'autre part, cette intensité dépendant de la grandeur des forces magnétiques.

Si l'on considère un fil conducteur parcouru par un courant électrique, et si l'on place perpendiculairement à ce fil une feuille de papier qu'il traverse, on constate, en saupoudrant cette feuille de limaille de fer, que les grains s'agglomèrent encore suivant certaines lignes circulaires, indiquant l'existence de lignes de force magnétiques. Le sens de ces lignes de force est facile à trouver de la façon suivante : si l'on suppose un observateur placé le long du fil (fig. 8) de telle façon que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête, les lignes de force se dirigent de la droite vers la gauche de l'observateur.

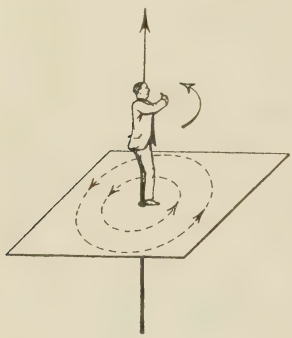


Fig. 8.

Ainsi donc, *tout conducteur parcouru par un courant électrique est environné par un champ magnétique.* On démontre théoriquement et l'on vérifie expérimentalement que *toute variation d'intensité d'un champ magnétique détermine, dans un conducteur qui coupe ce champ, l'apparition d'une force électromotrice* : la valeur de celle-ci est proportionnelle à la vitesse de variation du champ magnétique (c'est-à-dire à la variation par seconde). Sous l'effet de cette force électromotrice, il existe entre les extrémités du conducteur une certaine différence de potentiel qui, si ces extrémités sont reliées à un circuit conducteur, détermine dans celui-ci le passage d'un courant électrique.

Revenons au fil rectiligne parcouru par un courant (fig 8). Ployons ce fil en forme de boucle et considérons les lignes de force magnétiques circulaires qui entourent chacun des points du conducteur : pour simplifier, fixons notre attention sur les deux points d'intersection de la boucle et d'une feuille de papier (fig. 9). Le sens de ces lignes de force, déterminé comme précédemment, est indiqué par les flèches : toutes les lignes de

force de même sens s'ajoutant les unes aux autres, la boucle de fil est traversée par un flux magnétique dont la direction est indiquée par les flèches centrales (fig. 9). *La boucle de fil parcourue par un courant est donc équivalente à un aimant plat* ayant son pôle nord sur une face (celle qui se trouve du côté du lecteur), et son pôle sud sur l'autre face (du côté opposé au lecteur). Le pôle nord se trouve à la gauche de l'observateur couché sur le fil comme précédemment et regardant le centre de la boucle : on dit plus simplement qu'il est à la gauche du courant circulaire.

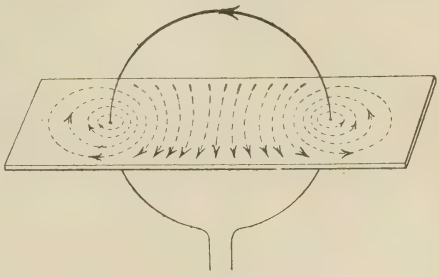


Fig. 9.

Il est évident que le flux magnétique produit par une boucle de fil est proportionnel à l'intensité du courant qui passe dans ce fil.

Si, au lieu d'une boucle, on forme avec du fil conducteur 10, 100, 1000 boucles du même diamètre juxtaposées en une bobine et parcourues dans le même sens par le même courant, il est évident que, le flux produit par chaque boucle s'ajoutant aux flux produits par les boucles voisines, la bobine donnera un flux total 10, 100, 1000 fois plus grand que le flux d'une seule boucle parcourue par un courant de même intensité : on réalise ainsi ce qu'on appelle un *solénoïde*. En plaçant à l'intérieur de ce solénoïde un noyau de fer, dont la présence augmente la conductibilité magnétique [1] du chemin suivi par les lignes de force, on obtient un *électro-aimant*.

---

[1] La conductibilité magnétique s'appelle *perméabilité* : la perméabilité de l'air, des isolants et de tous les métaux non magnétiques (c'est-à-dire en pratique tous les métaux autres que le fer, le nickel et leurs alliages), est égale à l'unité. La perméabilité du fer est d'autant plus grande que le métal est plus pur : elle peut atteindre 2 500 fois celle de l'air.

La résistance magnétique est appelée *réluctance*.

L'introduction d'un noyau de fer à l'intérieur d'un solénoïde a pour effet d'augmenter le flux magnétique produit par ce solénoïde, puisque la résistance, ou réluctance, qui s'oppose au passage de ce flux est diminuée.

D'après ce qui précède, il est évident que la puissance d'un électro-aimant augmente avec le nombre de tours de fil et avec l'intensité du courant. La figure 10 représente un électro-

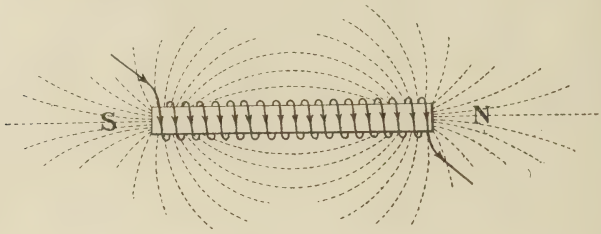


Fig. 10.

aimant : le pôle nord se trouve à la gauche des courants circulaires et le pôle sud à leur droite. La répartition du champ magnétique existant au voisinage d'un électro-aimant est identique à celle du champ magnétique qui existe au voisinage d'un aimant.

On sait que les pôles de même nom de deux aimants s'attirent et que les pôles de nom contraire se repoussent. Puisqu'une boucle de fil parcourue par un courant équivaut à un aimant, il se produira des attractions ou des répulsions analogues entre elles et un barreau aimanté, de même qu'entre deux boucles différentes ou entre deux conducteurs parcourus par un courant électrique. Par exemple, la boucle de fil de la figure 11, parcourue par un courant dans le sens de la flèche, sera repoussée par le pôle nord N de l'aimant voisin, puisqu'elle présente un pôle nord N sur la face tournée vers cet aimant. Si le courant dans la boucle était de sens inverse, la boucle aurait un pôle sud sur sa face tournée vers l'aimant, et elle serait attirée par lui.

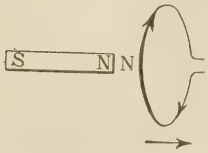


Fig. 11.

Induction électromagnétique.

Considérons un aimant ou un électro-aimant dont le flux magnétique s'épanouit dans l'espace comme cela a été dit.

Prenons une boucle de fil métallique fermée sur elle-même et plaçons-la à une certaine distance de l'aimant, perpendiculairement aux lignes de force magnétiques qui en émanent (fig. 12), puis approchons-la peu à peu de l'aimant. Le flux magnétique qui traverse la boucle de fil varie pendant ce mouvement, puisque le nombre de lignes de force embrassées par la boucle va en augmentant. Cette *variation de flux* donne naissance à une force *électromotrice induite*, qui engendre, dans cette boucle fermée, un *courant induit*. Si l'on cesse de déplacer la boucle, la force électromotrice induite et le courant s'annulent, puisqu'il n'y a plus de variation de flux. Si l'on éloigne la boucle de l'aimant, la variation de flux (diminution) que produit ce mouvement donne naissance à une force électromotrice induite, inverse de la précédente (c'est-à-dire que le sens de la différence de potentiel engendrée et, par suite, du courant, est inversé).

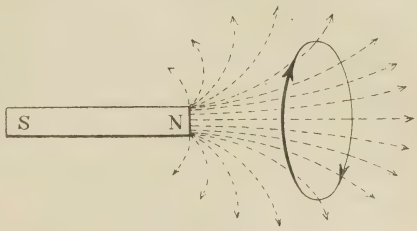


Fig. 12.

Le sens du courant induit est tel que l'effet de ce courant tende à s'opposer au mouvement qui lui donne naissance : par exemple, quand on approche la boucle de l'aimant, le courant induit a le sens marqué par la flèche, de façon que la boucle présente sur sa face tournée du côté de l'aimant un pôle nord, dont l'action sur le pôle nord de l'aimant tende à empêcher le mouvement : inversement, si l'on éloigne la boucle, le courant induit est de sens contraire, pour que la boucle présente un pôle sud sur sa face tournée du côté de l'aimant, et que l'action de celui-ci sur le pôle nord de l'aimant tende à s'opposer au mouvement d'éloignement.

Si, au lieu de considérer une ou plusieurs boucles de fil embrassant une plus ou moins grande partie du flux magnétique d'un aimant, nous considérons un conducteur rectiligne qui se déplace à travers le champ, le résultat est le même, ce conducteur pouvant toujours être considéré comme une portion de circonférence de rayon infiniment grand.

Le flux magnétique, au lieu d'être produit par un aimant, peut être produit par un électro-aimant, par un solénoïde, par une boucle de fil, ou même par un simple conducteur parcouru par un courant : le résultat est toujours le même. *On appelle* **induction** *le phénomène par lequel une force électromotrice est induite par une variation du flux magnétique.* Le circuit qui agit sur l'autre est dit circuit *inducteur,* ou primaire ; celui dans lequel apparaît une force électromotrice induite est dit circuit *induit*, ou secondaire. La variation de flux magnétique peut être produite, soit par un déplacement de l'un des deux circuits par rapport à l'autre, soit par une variation du courant dans le circuit inducteur, les deux circuits étant immobiles. Le premier mode de variation est utilisé dans les générateurs électromécaniques, et le second dans les transformateurs.

Induction mutuelle et self-induction.

L'induction qui s'exerce entre deux circuits est appelée **induction mutuelle.** La valeur de la force électromotrice induite par l'un des circuits dans l'autre dépend de la valeur de l'induction mutuelle. Celle-ci est caractérisée par un certain coefficient, généralement désigné par la lettre M, qu'on appelle *coefficient d'induction mutuelle.* Ce coefficient est égal à la valeur du flux magnétique embrassé par l'un des circuits quand l'autre circuit est parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité.

Il existe un autre phénomène d'induction extrêmement important que nous allons étudier : c'est l'*induction d'un conducteur sur lui-même, nommée* **self-induction** (auto-induction), ou induction propre.

Tout courant électrique produit, comme nous l'avons vu, un champ magnétique. Un fil métallique traversé par un courant est environné d'un tel champ ; si le courant cesse, le champ magnétique disparaît ; il y a donc une *variation de champ magnétique au moment de la cessation du courant.* Or nous savons que toute variation de champ magnétique engendre une force électromotrice induite dont le sens est tel qu'elle tende à s'opposer

à la cause qui l'a fait naître. Donc, au moment où le courant va cesser, *le fil sera le siège d'une force électromotrice induite, dite force électromotrice de self-induction,* dont la valeur sera d'autant plus grande que l'intensité du champ magnétique était plus grande et que sa variation est plus rapide, c'est-à-dire d'autant plus grande que l'intensité du courant primitif était plus grande et que ce courant est plus vite rompu. Cette force électromotrice produit dans le circuit un courant de même sens que le courant précédent, puisque son sens est tel qu'elle s'oppose à la cause qui l'a fait naître, c'est-à-dire à la cessation du courant.

Inversement, si l'on fait agir sur un conducteur une certaine différence de potentiel, le courant qui tend à s'établir engendre un champ magnétique autour du conducteur. Il y a donc une variation du champ magnétique, qui était nul et qui va atteindre une certaine valeur. Cette variation de champ magnétique induit dans le conducteur une certaine force électromotrice, dont le sens est tel qu'elle s'oppose à la cause qui lui donne naissance, c'est-à-dire à l'établissement du courant. Dans ces conditions, la différence de potentiel disponible pour faire circuler le courant dans le conducteur est égale à la différence entre la différence de potentiel agissante et la force électromotrice antagoniste de self-induction : le courant ne peut atteindre que peu à peu sa valeur normale.

En pratique, la self-induction d'un conducteur simple est très faible parce que le champ magnétique qui l'entoure est relativement peu important. Mais si l'on enroule ce conducteur sous forme d'une bobine comprenant un certain nombre de tours, chaque tour embrasse la totalité du flux magnétique engendré par la bobine, c'est-à-dire la somme des lignes de force magnétiques produites par tous les tours. La self-induction de la bobine est donc considérable, puisque, d'une part, elle est proportionnelle au nombre de tours, et que, d'autre part, la self-induction de chaque tour augmente proportionnellement au nombre de tours de la bobine. On voit immédiatement, d'après cela, que la self-induction totale doit croître comme le carré du nombre de tours. Il est évident que, si l'on introduit un noyau de fer dans une bobine comprenant

un certain nombre de tours de fils juxtaposés, la self-induction de cette bobine sera accrue, puisque le flux magnétique augmente.

La self-induction d'un conducteur, d'une bobine, ou plus généralement d'un circuit électrique, est caractérisée par un certain coefficient, généralement désigné par la lettre L et appelé *coefficient de self-induction*. Ce coefficient est égal au flux total produit par le circuit quand il est parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité.

CHAPITRE IV

PRODUCTION ET TRANSFORMATION DU COURANT ÉLECTRIQUE

Les appareils qui permettent de produire, entre deux points, une différence de potentiel permanente, s'appellent des machines électriques, ou des *générateurs électriques* : ils utilisent pour cela des réactions chimiques, thermiques ou mécaniques. Il faut bien se pénétrer de l'idée que ces générateurs n'engendrent pas de l'énergie électrique : ils transforment une des formes de l'énergie en une autre forme de l'énergie.

Générateurs électriques.

Les *appareils électrochimiques* (piles et accumulateurs) transforment en énergie électrique l'énergie chimique que possèdent certains sels en présence de certains métaux : les sels sont décomposés et les métaux sont dissous pendant cette transformation. Dans les piles, les produits de décomposition sont jetés après épuisement de l'appareil ; dans les accumulateurs, ces produits sont décomposés en sens inverse et ramenés à leur état initial par le passage d'un courant électrique, dit courant de charge, traversant l'appareil en sens inverse du courant de décharge.

Les *appareils thermo-électriques* transforment de l'énergie calorifique en énergie électrique, en utilisant certains phénomènes, dits thermo-électriques, qui se manifestent au contact de deux métaux différents lorsqu'il existe, entre les soudures voisines de ces métaux, une différence de température importante.

Les *appareils électromécaniques* transforment de l'énergie

mécanique en énergie électrique, au moyen de réactions électromagnétiques que nous allons étudier : les générateurs électriques de ce type sont les seuls employés dans l'industrie.

Tous ces générateurs, électro-chimiques, thermo-électriques ou mécaniques, transformant de l'énergie d'une forme donnée en énergie d'une autre forme (énergie électrique), présentent forcément des pertes. Leur *rendement*, c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique recueillie à l'énergie d'une autre forme fournie au générateur, est donc toujours inférieur à l'unité. Il se rapproche beaucoup de l'unité dans les appareils électromécaniques ; il a une valeur médiocre dans les appareils électrochimiques, et il est très mauvais dans les générateurs thermoélectriques, qui ne sont susceptibles d'aucun emploi pratique.

Un générateur électrique est caractérisé par la force électromotrice qu'il produit et par l'intensité de courant qu'il peut débiter dans un circuit sous l'action de la différence de potentiel créée par la force électromotrice. On confond souvent à tort, dans le langage vulgaire, les mots force électromotrice et différence de potentiel : on emploie aussi fréquemment, en pratique, le mot *tension* pour désigner l'une ou l'autre d'entre elles.

Machines dynamo-électriques.

D'après ce qui précède, il est facile de comprendre le principe sur lequel reposent les générateurs qui transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Considérons un champ magnétique uniforme figuré par des flèches (fig. 13) et une boucle de fil, placée dans ce champ, et susceptible de tourner autour de son diamètre vertical. On voit que le flux magnétique embrassé par la boucle varie pendant cette rotation : il est maximum quand le plan de la boucle est perpendiculaire aux lignes de force, et il est nul quand le plan de la boucle est parallèle aux lignes de force. Si la boucle fait un tour

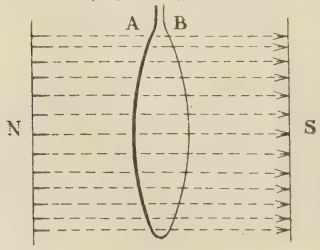


Fig. 13.

complet en partant de la position perpendiculaire aux lignes de force, le flux magnétique embrassé par elle s'annule, change de sens relatif (puisqu'il ne pénètre plus par la même face de la boucle), croît en valeur jusqu'à ce que la boucle soit redevenue perpendiculaire aux lignes de force, décroît ensuite, s'annule à nouveau, change de sens relatif (il pénètre alors par la face primitive) et augmente jusqu'à sa valeur maxima.

Le taux de variation du flux n'est pas constant pendant la rotation : on voit sur la figure 14, représentant une vue en plan, que, pour un même angle de rotation de la boucle, le nombre de lignes de force embrassées varie d'autant plus vite que la boucle se rapproche plus de la position C′D′ perpendiculaire à la position initiale CD. Dans ces conditions, pendant un tour de la boucle partant de la position CD, la force électromotrice induite va d'abord en croissant, atteint un maximum (qui correspond à la position C′D′ de la boucle, c'est-à-dire à un quart de tour), décroît, s'annule (au bout d'un demi-tour), change de sens, croît en valeur jusqu'à un maximum M′ (au bout de trois quarts de tour), puis décroît et s'annule.

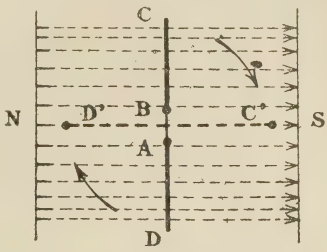


Fig. 14.

Si l'on porte sur une droite horizontale les valeurs de l'angle de rotation de la boucle, ou, ce qui revient au même, les valeurs du temps écoulé depuis l'origine du mouvement, et si l'on trace, aux points correspondant aux différentes valeurs du temps, des verticales proportionnelles aux différentes valeurs qu'a la force électromotrice à ces instants successifs, on obtient une courbe représentative, telle que celle de la figure 15. Une telle force électromotrice est dite alternative, parce qu'elle change de sens tous les demi-tours : elle est caractérisée par la forme de sa courbe représentative, et par la valeur maxima qu'elle atteint.

Si les deux extrémités de la boucle sont réunies, par l'intermédiaire de bagues et de frotteurs, à un circuit conducteur fermé, un certain courant traverse ce circuit sous l'action de la différence de potentiel existant entre les extrémités A et B de la

boucle. La forme de ce courant sera la même que celle de la différence de potentiel, et par suite, de la force électromotrice induite ; la courbe représentative du courant en fonction du temps sera donc semblable à la courbe de la figure 15. Un tel courant est dit *courant alternatif*.

On appelle *période du courant alternatif* le temps correspon-

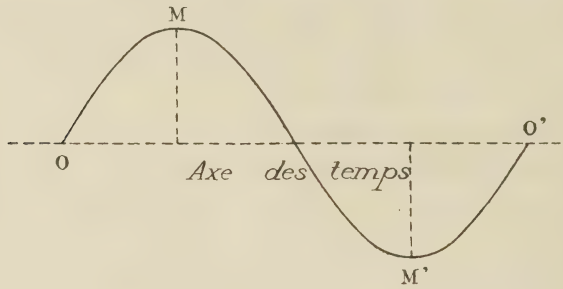


Fig 15.

dant à la longueur OO′, c'est-à-dire la durée d'une variation complète (ici la durée d'un tour de la boucle). On appelle *fréquence du courant alternatif* le nombre de périodes par seconde. Les courants alternatifs industriels ont généralement une fréquence de 50 ou de 25 périodes par seconde, c'est-à-dire que la variation complète du courant dure 1/50 ou 1/25 seconde.

Il est évident que si, au lieu d'une boucle de fil, on fait tourner ensemble 10, 100, 1000 boucles formant une bobine enroulée sur un cadre, la force électromotrice induite sera 10, 100, 1000 fois plus élevée. En pratique, on enroule sur un noyau de fer un grand nombre de tours de fil, pour constituer le système induit, et l'on produit le flux magnétique nécessaire au moyen d'un système inducteur comprenant un certain nombre d'électro-aimants. L'un des deux systèmes est mobile à l'intérieur de l'autre et est calé sur un arbre entraîné par un moteur mécanique.

Si, au lieu de courant alternatif, on veut recueillir du *courant continu*, c'est-à-dire toujours de même sens, on adjoint au générateur électrique un organe appelé commutateur ou *collecteur*, composé d'un certain nombre de lames isolées les unes

des autres, et ayant pour fonction de redresser les portions inférieures de la courbe du courant, comme le montre la figure 16 (courbe en trait plein). En reliant entre elles plusieurs bobines qui occupent, à un même instant, des positions différentes par rapport au champ inducteur, on peut faire en sorte que la force électromotrice résultante (c'est-à-dire la somme des forces électromotrices induites dans les différentes bobines) soit extrêmement peu pulsatoire. On s'en rend compte en examinant la figure 16, sur laquelle sont tracées les forces électro-

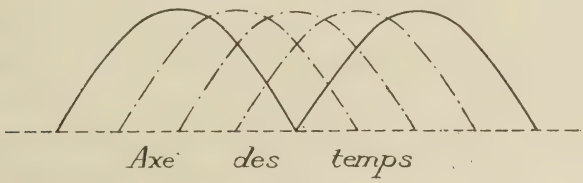


Fig. 16.

motrices induites de quatre bobines seulement, et en additionnant ces forces électromotrices.

Bobines de self-induction.

Prenons une bobine comprenant un certain nombre de tours de fil conducteur isolés les uns des autres, et relions ses extrémités à une source de courant continu. Conformément à ce qui a été expliqué précédemment, nous constatons que, sous l'action de la différence de potentiel produite par le générateur, le courant ne prendra pas instantanément sa valeur normale : *la self-induction de la bobine s'oppose à l'établissement du courant, comme une inertie* que celui-ci devrait vaincre avant de pouvoir circuler dans le conducteur. Inversement, quand on rompt le circuit pour interrompre le courant, il se produit à la coupure une étincelle chaude et bruyante, due à un extra-courant de même sens que le courant précédent : *la self-induction agit, comme une inertie* (1), *pour prolonger le passage du courant.*

(1) Si l'on veut imprimer un mouvement à un corps immobile, l'inertie de ce corps tendra, au début, à empêcher l'établissement de ce mouvement. Inversement,

Si l'on place un noyau de fer dans l'intérieur d'une bobine, la self-induction de celle-ci augmente considérablement parce que la perméabilité magnétique élevée du fer diminue la réluctance magnétique que rencontrent dans leur trajet les lignes de force relatives à chaque tour de fil. Si, au contraire, on déroule le fil de la bobine pour l'allonger sous forme d'un conducteur rectiligne, la self-induction diminue considérablement, parce que l'induction propre du conducteur est très faible.

Relions maintenant la bobine, avec ou sans noyau de fer ([1]), à un générateur électrique produisant une différence de potentiel alternative. Le courant qui tend à passer dans la bobine variant périodiquement, comme la différence de potentiel qui l'engendre, le flux qu'il produit présente les mêmes variations, et la self-induction est perpétuellement en jeu pour empêcher l'établissement du courant, chaque fois que la tension alternative va en croissant depuis zéro jusqu'à sa valeur maxima, ou pour s'opposer à la diminution du courant, chaque fois que la tension alternative décroît de sa valeur maxima à zéro. L'effet de ces phénomènes de self-induction est de limiter l'intensité du courant qui passe dans la bobine sous l'action d'une différence de potentiel alternative donnée. La self-induction joue donc, dans ce cas, le rôle d'une résistance, et l'on appelle *résistance inductive* cette résistance *apparente* qu'elle présente au passage d'un courant alternatif. La résistance électrique *réelle* d'un conducteur, dont il a déjà été question, est appelée *résistance ohmique* ([2]). Le conducteur qui constitue la bobine présentant forcément lui-même une certaine résistance ohmique, on voit

---

si l'on veut arrêter le corps une fois qu'il a été mis en mouvement, l'inertie tendra à prolonger le mouvement. On voit que, au point de vue électrique, la self-induction joue identiquement le même rôle : c'est pourquoi l'on dit qu'elle agit comme une inertie.

([1]) Si la bobine contient un noyau de fer, ce dernier doit être en fils de fer ou en tôles pour éviter la production de courants de Foucault, comme on le verra dans le paragraphe suivant.

([2]) Tandis que l'existence de la résistance ohmique occasionne une certaine perte d'énergie (convertie en chaleur) lorsqu'un courant électrique continu ou alternatif traverse un circuit, la présence de la résistance inductive, ou apparente, agit seulement pour limiter l'intensité du courant alternatif que peut faire circuler dans le circuit une différence de potentiel alternative donnée ; elle n'occasionne pas de perte d'énergie.

que *les deux sortes de résistance, apparente et réelle, agissent ensemble pour limiter l'intensité du courant alternatif.*

Il est évident que, plus le flux varie rapidement, plus les phénomènes de self-induction sont accentués, puisque la force électromotrice induite est proportionnelle au taux de variation du flux. Par conséquent, plus la fréquence du courant alternatif est grande, et plus la résistance apparente d'une bobine donnée est grande.

Transformateurs.

Au lieu d'obtenir, comme dans les générateurs, une variation de flux par déplacement d'un circuit par rapport à un autre circuit, on peut disposer les deux circuits de façon que leur induction mutuelle ait la plus grande valeur possible, et faire passer dans l'un des deux un courant périodiquement variable, tel qu'un courant alternatif. Le flux magnétique engendré par le circuit primaire variera comme le courant, et ses variations induiront dans le circuit secondaire une force électromotrice déterminée de forme semblable à celle du courant inducteur, c'est-à-dire alternative. L'appareil ainsi réalisé s'appelle un *transformateur*.

En pratique, un transformateur comprend essentiellement un *circuit magnétique* composé de deux noyaux de fer [1] reliés par deux culasses de façon à présenter au flux magnétique un chemin continu fermé de faible réluctance magnétique : l'un des noyaux porte une bobine primaire P ; l'autre porte une bobine secondaire S. Quand un courant alternatif passe dans l'enroulement P, un flux alternatif circule dans tout le circuit magnétique : chaque tour de l'enroulement S embrassant la totalité de ce flux, la force électromotrice totale induite dans la bobine S sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de tours.

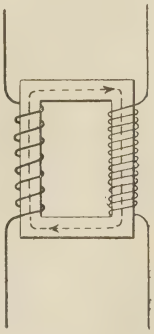


Fig. 17.

Étudions d'un peu plus près ce qui se passe.

---

(1) Si les noyaux de fer étaient massifs, ils présenteraient eux-mêmes, dans leur

Supposons d'abord que la bobine secondaire soit à circuit ouvert, c'est-à-dire que les deux extrémités de cette bobine ne sont reliées à aucun circuit extérieur et sont isolées l'une de l'autre. L'enroulement secondaire ne joue alors aucun rôle, et sa présence n'intervient pas ; le primaire du transformateur se comporte identiquement comme une bobine de self-induction. Les lignes de force magnétiques engendrées par cette bobine rencontrent dans leur trajet une très faible réluctance, puisqu'elles passent uniquement dans du fer. Dans ces conditions, un courant de très faible intensité produit un flux de valeur élevée dont les variations induisent dans la bobine une force électromotrice de self-induction de valeur élevée. Celle-ci est opposée à la différence de potentiel aux bornes de l'enroulement primaire, comme nous l'avons vu précédemment, et lui est presque égale en valeur : la différence de potentiel résultante, qui est égale à la différence entre la différence de potentiel aux bornes et la force électromotrice de self-induction, a donc une valeur très faible. Or c'est cette différence de potentiel résultante qui fait circuler le courant dans l'enroulement primaire : ce courant a donc une très faible intensité.

S'il n'y a aucune fuite des lignes de force magnétiques dans l'espace environnant, la totalité du flux magnétique qui traverse la bobine primaire traverse aussi la bobine secondaire. Ce flux variable induit évidemment dans chaque tour de l'enroulement secondaire une force électromotrice égale à la force électromotrice de self-induction qu'il induit dans chaque tour de l'enroulement primaire, et, comme nous l'avons vu, cette force électromotrice de self-induction est presque égale à la différence de potentiel créée par la source extérieure entre les

---

masse, un très grand nombre de circuits fermés. Ces circuits, embrassant le flux magnétique variable qui circule dans le noyau, seraient, comme les tours d'un enroulement secondaire, parcourus par des courants induits. Les courants ainsi produits dans la masse du métal sont nommés *courants de Foucault* ou *courants tourbillonnaires*. Afin d'éviter leur formation, qui provoque un échauffement des noyaux et qui entraîne une perte d'énergie, on constitue les noyaux de fer de tous les appareils à courants alternatifs par des paquets de tôles très minces superposées et isolées les unes des autres. De la sorte, le métal ne présente aucun circuit continu et les courants de Foucault sont considérablement réduits.

extrémités d'un tour de fil de la bobine primaire. On voit donc que la force électromotrice totale induite dans l'enroulement secondaire est à peu près égale au nombre de tours de cet enroulement multiplié par la différence de potentiel entre les extrémités d'un tour de l'enroulement primaire : celle-ci est elle-même évidemment égale à la différence de potentiel totale agissant sur la bobine primaire, divisée par le nombre de tours de cette bobine [1]. Il en résulte que la force électromotrice induite dans le secondaire (et par suite la différence de potentiel disponible aux extrémités de cet enroulement) est égale à la différence de potentiel agissant entre les extrémités de la bobine primaire multipliée par le rapport du nombre de tours de l'enroulement secondaire au nombre de tours de l'enroulement primaire. Ce rapport est appelé *rapport de transformation*. On voit que, si la bobine secondaire contient 10 000 tours et la bobine primaire 10 tours, la différence de potentiel secondaire sera 1 000 fois plus grande que la différence de potentiel primaire.

Supposons maintenant que les extrémités de la bobine secondaire soient reliées à un circuit extérieur : ce circuit est parcouru par un courant dont l'intensité est proportionnelle à la force électromotrice secondaire et inversement proportionnelle à la résistance électrique totale (y compris celle de la bobine). Le courant secondaire tend à produire à son tour un flux magnétique opposé au flux qu'engendre le courant primaire : il faut donc que celui-ci augmente par rapport à sa valeur primitive pour rétablir l'équilibre. Le flux produit par une bobine étant proportionnel à l'intensité du courant multipliée par le nombre de tours, il faudra, pour que les flux primaire et secondaire se compensent, que l'augmentation du courant primaire soit égale à 10, 100, 1 000 fois la valeur du courant secondaire si la bobine primaire a 10, 100, 1 000 fois moins de tours que la bobine secondaire, c'est-à-dire si le rapport de transformation est de 10, 100 ou 1 000.

En résumé on voit que, dans un transformateur, la diffé-

---

[1] Si la bobine primaire contient 10 tours par exemple, et si l'on appelle e la différence de potentiel aux bornes de cette bobine, la différence de potentiel entre les extrémités de chaque tour aura pour valeur $(1/10)\,e$.

rence de potentiel ou, pour abréger, la tension secondaire, est égale à la tension primaire multipliée par la valeur du rapport de transformation, et le courant secondaire est égal au courant primaire divisé par la valeur du rapport de transformation [1].

Pour que les effets d'induction du primaire sur le secondaire soient maxima, il faut que le coefficient d'induction mutuelle soit aussi élevé que possible. En fait, les lignes de force magnétiques engendrées par le circuit primaire ne traversent pas toutes le circuit secondaire : un certain nombre d'entre elles passent par l'air et ne concourent pas à la production d'une force électromotrice secondaire. On dit que le transformateur présente de la *dispersion*. Théoriquement, s'il n'y avait pas de dispersion, le coefficient d'induction mutuel M serait égal à la racine carrée du produit des coefficients de self-induction de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire pris isolément. En appelant M le coefficient d'induction mutuelle, L_1 et L_2 les coefficients de self-induction du primaire et du secondaire, on aurait :

$$M^2 = L_1 L_2 \quad \text{ou} \quad M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Pratiquement, à cause de la dispersion, le coefficient d'induction mutuelle a une valeur inférieure à cette valeur.

On définit fréquemment l'*accouplement entre le primaire et le secondaire* par le rapport du coefficient réel d'induction mutuelle à la racine carrée du produit des deux coefficients de self-induction. Le *coefficient d'accouplement magnétique* k est donné par la formule :

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Quand il n'y a pas de dispersion, le numérateur et le dénominateur de cette expression sont égaux, et le coefficient k est égal à l'unité, On dit que l'*accouplement* est *rigide* (ou parfait).

---

[1] En fait, l'intensité du courant secondaire est inférieure à cette valeur à cause des pertes d'énergie dans le transformateur, dont le rendement est un peu inférieur à l'unité. De même, la tension secondaire est très légèrement inférieure au produit de la tension primaire par le rapport de transformation.

Si, au contraire, la dispersion est telle que la valeur de k soit petite, inférieure à 0,5 par exemple, on dit que l'*accouplement* est *lâche* (ou imparfait).

Les transformateurs sont des appareils extrêmement commodes toutes les fois que l'on dispose de courant alternatif, car ils permettent d'élever ou d'abaisser à volonté la tension suivant les applications. Les effets d'induction entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire sont d'autant plus intenses que la fréquence du courant alternatif primaire est plus élevée. Les transformateurs employés avec des courants de très grande fréquence, tels que ceux utilisés en télégraphie sans fil, ne contiennent pas de fer.

Bobine de Ruhmkorff.

Lorsqu'on a besoin de hautes tensions et qu'on dispose seulement de courant continu [1], on peut le convertir en courant intermittent au moyen d'un commutateur tournant qui effectue des interruptions périodiques, et l'on utilise ce courant intermittent pour produire, dans le noyau d'un transformateur, un flux variable.

La *Bobine de Ruhmkorff*, ou *Bobine d'induction*, souvent employée en télégraphie sans fil, repose sur ce principe. Elle comprend (fig. 18) un noyau de fer [2] sur lequel sont enroulées une bobine primaire P contenant un petit nombre de tours de gros fil et une bobine secondaire S contenant un très grand nombre de tours de fil fin. Le courant intermittent qui circule dans l'enroulement primaire P produit dans le noyau de fer un flux magnétique variable qui se referme par l'air environnant : ce flux induit dans l'enroule-

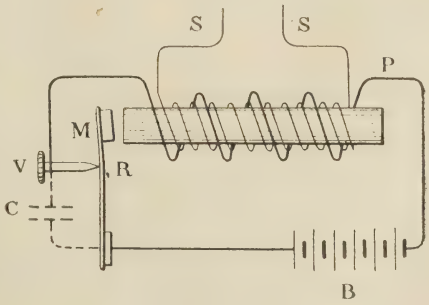


Fig. 18.

[1] Fourni, par exemple, par des piles ou des accumulateurs.

[2] Ce noyau est en fils de fer pour éviter la production de courants de Foucault.

ment secondaire une force électromotrice proportionnelle au rapport de transformation. Ce rapport étant, en général, très grand, la tension secondaire est très élevée et permet d'obtenir des étincelles électriques de plusieurs centimètres de longueur.

Sur le schéma de la figure 18, on a supposé que le courant, provenant d'une batterie de piles ou d'accumulateurs B, était rendu intermittent par le jeu d'un interrupteur-trembleur à marteau, d'après un dispositif fréquemment adopté. Le trembleur consiste en une petite masse M fixée à l'extrémité d'un ressort plat R : une vis V appuie sur un contact fixé à ce trembleur. Dans la position du trembleur représentée sur la figure, la vis V appuie sur le contact et le circuit primaire est fermé ; le courant s'établit donc dans l'enroulement primaire. A ce moment, le noyau de fer s'aimante et attire la masse du trembleur ; le contact s'éloigne de la vis V, le circuit est rompu, et le courant cesse. Le trembleur revient alors à sa position primitive sous l'action du ressort R, et le contact se rétablit, etc. Pour atténuer les étincelles produites entre les points de contact au moment des ruptures [1], on place généralement en dérivation sur ceux-ci un condensateur C (figuré en pointillé).

---

[1] Étincelles produites par l'extra-courant de rupture dû à la self-induction de l'enroulement primaire P.

CHAPITRE V

PRODUCTION DES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES

La télégraphie sans fil repose sur la production d'ondes électromagnétiques qui progressent dans l'espace. Pour obtenir de telles ondes, il faut engendrer, en un point donné, un mouvement vibratoire de l'éther : ce mouvement vibratoire est produit par des oscillations électriques [1] fournies par des appareils nommés oscillateurs ou excitateurs, dont le fonctionnement va être étudié dans ce chapitre.

Circuits oscillants.

Formons un circuit contenant un condensateur $\alpha\beta$ de capacité C (fig. 19), une bobine de self-induction L [2] et un appareil, nommé éclateur, composé de deux sphères ou tiges métalliques A et B que sépare un certain intervalle d'air. Relions les deux sphères A et B aux extrémités de l'enroulement secondaire d'une bobine de Ruhmkorff ou d'un transformateur capable de produire une différence de potentiel élevée. Le primaire P de cette bobine ou de ce transformateur est alimenté soit par du courant intermittent, soit par du courant alternatif.

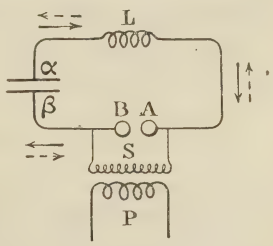


Fig. 19.

---

[1] Le mot oscillation électrique est employé en général pour désigner un courant alternatif de très grande fréquence.

[2] Comprenant quelques tours de fil et ne contenant pas de fer.

Quand le courant circule dans le primaire P, la différence de potentiel secondaire agit pour charger peu à peu le condensateur dont les deux armatures α et β prennent des potentiels croissants égaux et de signe contraire. Pendant toute la durée de la charge, le circuit est parcouru par un certain courant, dont la valeur ne nous importe pas en ce moment. La différence de potentiel V, qui existe à un instant quelconque entre les deux armatures du condensateur, existe aussi entre les deux sphères A et B de l'éclateur, puisque chacune de celles-ci est reliée métalliquement à l'une des armatures (1). A un moment donné, cette différence de potentiel, qui va en croissant avec la charge du condensateur (2), atteint la valeur pour laquelle l'intervalle d'air compris entre les sphères A et B (3) de l'éclateur ne peut plus résister à la tension électrostatique qui agit sur lui. A ce moment, une étincelle jaillit en AB.

Cette étincelle électrique, formée de particules incandescentes entourées de gaz chauds, a une conductibilité électrique relativement bonne ; elle établit donc entre les sphères A et B une jonction conductrice qui ferme le circuit. Le condensateur, qui se trouve alors relié au circuit ininterrompu αLDABβ, se décharge dans celui-ci en donnant naissance à un courant dont la direction est, par exemple, indiquée par les flèches en trait plein (fig. 19). Mais la self-induction de la bobine L joue, ainsi qu'on l'a vu (page 35), un rôle analogue à celui de l'inertie : lorsque le courant de décharge prend fin,

---

(1) Nous avons vu, en effet (p. 22), que deux corps conducteurs reliés ensemble par un fil métallique sont au même potentiel.

(2) On a vu, en effet (p. 19), que la charge Q d'un condensateur est proportionnelle à la capacité C et à la différence de potentiel V. Pour une capacité donnée, la différence de potentiel entre les armatures va donc en croissant avec la charge que prend le condensateur. Normalement, si aucune autre cause n'intervient, la charge s'arrête lorsque la différence de potentiel V entre les armatures du condensateur est égale à la plus grande différence de potentiel qu'est capable de produire la source de courant.

(3) Cet intervalle d'air est nommé *distance explosive,* et sa valeur est réglée d'après la différence de potentiel que peut produire la source de courant. S'il est trop grand, l'étincelle ne peut pas jaillir ; s'il est trop faible, la charge du condensateur est relativement faible lorsque l'étincelle jaillit.

l'énergie absorbée par la self-induction, au moment de l'établissement du courant, pour la création d'un champ magnétique, se trouve libérée et intervient, sous forme d'une force électromotrice induite, pour prolonger le courant qui circule dans le circuit. Le nouveau courant, ainsi créé dans le même sens que le courant de décharge précédent, produit une recharge du condensateur en sens inverse de la charge primitive [1]. Quand le courant de self-induction prend fin, le condensateur rechargé se décharge à nouveau : le sens du courant de cette nouvelle décharge est inverse du précédent, et est indiqué sur la figure 19 par les flèches pointillées. Pendant cette décharge, la self-induction absorbe à nouveau de l'énergie pour la création d'un champ magnétique et la restitue, à la fin de la décharge, sous forme d'un courant induit : le condensateur se recharge donc en sens inverse, puis se décharge à nouveau, etc.

Ces phénomènes se passent pendant un temps très court, et *le circuit est le siège de courants alternatifs de grande fréquence nommés oscillations ou vibrations électriques.* Tout circuit présentant de la self-induction et de la capacité, et excité par un moyen approprié (ici par l'action de la différence de potentiel produite par le secondaire S de la bobine) est le siège d'oscillations électriques engendrées, comme cela vient d'être expliqué, par les phénomènes d'échange d'énergie [2] qui se manifestent entre la capacité et la self-induction. *Un tel circuit est appelé circuit oscillant.*

Oscillations amorties.

Dans ce qui précède, nous avons vu que, à chaque recharge, le condensateur reçoit une quantité d'électricité inférieure à celle de la charge précédente, car différentes pertes inter-

---

(1) C'est-à-dire que, si, par exemple, l'armature α était chargée à un potentiel positif et l'armature β à un potentiel négatif lors de la charge primitive, ces armatures vont être chargées à des potentiels inverses, celui de α devenant négatif et celui de β positif.

(2) L'énergie en jeu dans le circuit oscille entre la forme électrostatique (charge du condensateur) et électrocinétique (création d'un champ magnétique).

viennent pour réduire peu à peu l'énergie en jeu dans le système oscillant ; ces pertes proviennent principalement de la résistance électrique du circuit métallique et surtout de l'étincelle. C'est pourquoi, après un certain nombre de décharges et recharges successives, la différence de potentiel agissant entre les sphères A et B de l'éclateur n'est plus suffisante pour maintenir l'étincelle : celle-ci cesse de jaillir, et le circuit est interrompu. A ce moment, le circuit oscillant se trouve dans les mêmes conditions qu'au début, et la différence de potentiel produite par le secondaire S de la bobine recommence à charger le condensateur : quand la charge est suffisante, la différence de potentiel entre A et B ayant atteint la valeur qui correspond à la rupture de la couche d'air interposée, l'étincelle jaillit à nouveau et les phénomènes décrits se reproduisent, en engendrant un nouveau groupe d'oscillations électriques.

Le phénomène par lequel est engendré un groupe d'oscillations est appelé *décharge oscillante*. Comme nous l'avons vu,

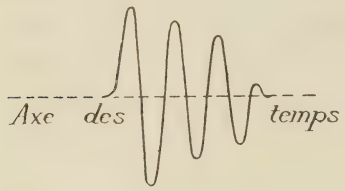


Fig. 20.

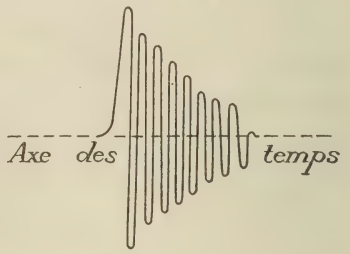


Fig 21.

les oscillations électriques successives appartenant à un même groupe n'ont pas une valeur constante mais décroissent rapidement, puisque les recharges successives du condensateur sont de plus en plus faibles : *ces oscillations sont amorties*, et l'on dit que le circuit oscillant présente de l'*amortissement* (provenant des pertes d'énergie) [1]. Si, comme pour la représentation d'un courant alternatif, on porte sur une droite horizontale les

[1] Si l'amortissement est très faible, la décroissance des oscillations est peu rapide, et l'on dit souvent alors que les oscillations sont persistantes.

valeurs du temps écoulé, et, sur les verticales correspondant à différentes valeurs du temps, les intensités du courant qui circule dans le circuit, on obtient, pour chaque groupe d'oscillations, une courbe analogue à celles que montrent les figures 20 et 21 (1).

On appelle *période* des oscillations la durée d'une oscillation complète, et *fréquence* des oscillations le nombre d'oscillations par seconde. La fréquence des oscillations représentées par la figure 21 est environ trois fois plus grande que celle des oscillations représentées par la figure 20. *La fréquence des oscillations propres* (2) *d'un circuit dépend de la capacité et de la self-induction que présente ce circuit* : elle est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de la capacité par la self-induction (3). Inversement, *la période propre d'oscillation d'un circuit est proportionnelle à la racine carrée du produit de la capacité par la self-induction* : en appelant t la période, on démontre théoriquement et on vérifie expérimentalement que cette période répond à la formule

$$t = 2\pi\sqrt{CL},$$

C et L désignant la capacité et la self-induction du circuit total, ou, en pratique, la capacité du condensateur et la self-induction de la bobine, puisque la capacité et la self-induction des fils de jonction ont des valeurs extrêmement faibles.

On voit immédiatement que, si l'on augmente la valeur de la capacité, ou de la self-induction, ou de ces deux grandeurs à la fois, on augmente la période des oscillations, et l'on diminue leur fréquence ; inversement, pour obtenir des oscillations de très grande fréquence, il faut employer un circuit présentant une faible self-induction et une faible capacité.

---

(1) Pour plus de clarté, on a représenté sur ces figures des oscillations fortement amorties et de fréquences relativement faibles : dans un circuit oscillant fermé, l'amortissement est sensiblement moindre, et un groupe comprend un plus grand nombre d'oscillations, une centaine par exemple.

(2) C'est-à-dire des oscillations d'un circuit oscillant librement ; nous verrons plus loin qu'un circuit peut effectuer, dans certaines conditions, des oscillations forcées d'une fréquence différente.

(3) En négligeant la résistance du circuit, qui est généralement faible et joue un rôle très minime dans la détermination de la fréquence d'oscillation.

La période ou la fréquence des oscillations peut être mesurée par le procédé suivant : l'étincelle qui jaillit entre A et B est une étincelle oscillante, puisqu'elle correspond au passage d'un courant oscillant. Au moment où ce courant oscillant s'annule pour changer de sens, l'étincelle cesse de jaillir pendant un temps très court et se rallume aussitôt. Ce phénomène ne peut pas être perçu par l'œil à cause de la persistance des impressions rétiniennes, mais, si l'on regarde l'étincelle dans un miroir tournant autour d'un axe avec une rapidité suffisante, on la voit décomposée en une série de points lumineux séparés par des espaces obscurs [1]. En photographiant cette image et en mesurant la vitesse de rotation du miroir, on peut déterminer la période des oscillations. On vérifie ainsi qu'elle correspond bien à la formule indiquée plus haut.

Nous avons vu qu'après une décharge oscillante, c'est-à-dire après la production d'un groupe d'oscillations amorties, l'étincelle cesse de jaillir et la charge du condensateur s'effectue à nouveau sous l'action de la différence de potentiel secondaire de la bobine ; ensuite une nouvelle décharge oscillante se produit quand l'étincelle jaillit entre les sphères A et B, et ainsi de suite.

On obtient donc dans le circuit oscillant une série de groupes d'oscillations amorties : deux groupes sont séparés l'un de l'autre par un intervalle de temps considérable relativement à la période d'une oscillation. La valeur de cet intervalle de temps dépend de diverses causes et, en particulier, du nombre d'interruptions par seconde du courant primaire de la bobine, ou de la fréquence du courant alternatif, s'il s'agit d'un transformateur. On peut évaluer à 1/50 seconde environ en moyenne la valeur de cet intervalle de temps. Si, par exemple, les oscillations ont une fréquence de 500 par seconde et si l'intervalle de temps entre deux groupes d'oscillations est de 1/50 seconde, on obtiendra une série de groupes analogue à celle que représente la figure 22.

---

[1] Si l'étincelle était continue au lieu d'être oscillante, on verrait dans le miroir tournant une bande lumineuse ininterrompue.

Les oscillations électriques ainsi engendrées sont, en quelque sorte, analogues aux vibrations acoustiques que l'on obtient en

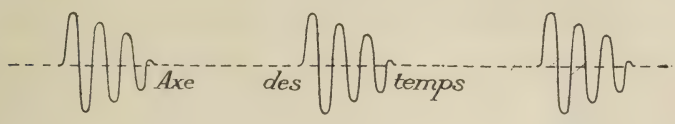


Fig. 22.

frappant une cloche à intervalles réguliers avec son battant : chaque choc donne lieu à un groupe de vibrations amorties, et ces groupes se succèdent, comme les chocs, à des intervalles réguliers.

En réalité, en télégraphie sans fil, les oscillations électriques employées ont une fréquence comprise à peu près entre 100 000 et 3 000 000 par seconde ; elles sont fortement amorties, de sorte que chaque groupe n'en comprend que deux ou trois ; dans ces conditions, l'intervalle de temps existant entre deux groupes est beaucoup plus considérable, par rapport à la période d'une oscillation ou à la durée d'un groupe, que ne l'indique la figure 22 relative au cas d'oscillations de fréquence 500. Par exemple, en supposant que l'intervalle de temps soit de 1/50 seconde et la période de 1/1 000 000 seconde, et que chaque groupe comprenne deux oscillations complètes, la durée de production d'un groupe sera de deux millionièmes de seconde, tandis qu'il s'écoulera entre deux groupes consécutifs un intervalle de temps de dix-huit mille millionièmes de seconde.

Oscillations entretenues.

Le fort amortissement des oscillations électriques produites par le mode d'excitation du circuit oscillant qui vient d'être décrit, et l'intervalle de temps important qui sépare deux groupes consécutifs d'oscillations, présentent de sérieux inconvénients au point de vue de la production d'ondes électriques, qui sera étudiée dans un prochain chapitre. Aussi certains expérimentateurs ont-ils cherché à engendrer des oscilla-

tions régulièrement entretenues au lieu de groupes d'oscillations amorties.

Dès 1892, M. E. Thomson proposait pour cela le dispositif que représente la figure 23. Une ligne à courant continu alimente un éclateur G à faible distance explosive sur lequel est branché en dérivation un circuit contenant un condensateur K et une bobine de self-induction H. Un puissant électro-aimant M agit sur l'arc électrique qui jaillit en G pour le souffler et le rendre instable [1]. Enfin une bobine de self-induction I est intercalée dans le circuit principal pour limiter l'intensité du courant au moment où l'arc jaillit. Sur la figure 23, la bobine H est supposée former l'enroulement primaire d'un transformateur, dont le secondaire aboutit à un éclateur TT.

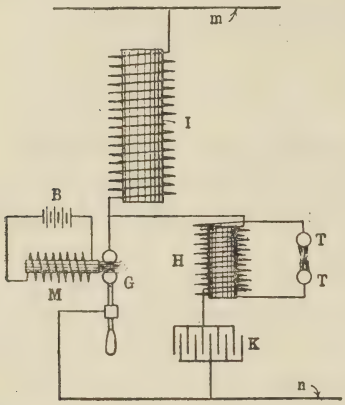


Fig. 23.

En 1900, M. Duddell signalait le phénomène suivant, appelé phénomène de l'arc chantant. Si l'on fait jaillir entre deux crayons de charbon homogènes un arc électrique A alimenté par une source S de courant continu (fig. 24), et si l'on branche en dérivation sur cet arc, comme dans le montage précédent, un circuit oscillant contenant une capacité C et une bobine de self-induction L, on constate que ce *circuit est le siège d'oscillations électriques régulières entretenues dont la fréquence dépend de la capacité et de la self-induction du circuit oscillant.* Les causes de la

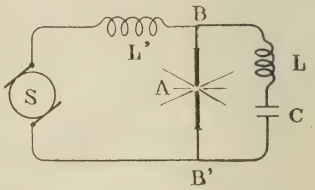


Fig. 24.

[1] D'après les lois de l'induction, on sait qu'il existe entre un flux magnétique et un conducteur parcouru par un courant électrique des forces d'attraction ou de répulsion dont la valeur dépend de la valeur du flux et de l'intensité du courant. L'arc électrique, constitué par un conducteur (colonne gazeuse) parcouru par un courant, est donc influencé par un flux magnétique transversal qui tend à le chasser de sa position. Ce phénomène est appelé *soufflage magnétique de l'arc.*

production de ce phénomène ont été étudiées en détail par M. Blondel et par MM. Simon et Reich, qui ont pu les expliquer en grande partie. La superposition des oscillations au courant continu dans l'arc donne lieu à des vibrations de la colonne gazeuse comprise entre les charbons : ces vibrations produisent un son musical, dont la hauteur dépend de la fréquence des oscillations et, par suite, de la valeur de la capacité et de la self-induction. Pour que le phénomène se produise avec netteté, il est bon d'introduire dans le circuit d'alimentation de l'arc A une bobine de self-induction L'.

Ce phénomène très intéressant ne permet pas normalement d'obtenir des oscillations de fréquence supérieure à 30000 ou 40000 au maximum. Pour que son emploi fût applicable à la télégraphie sans fil, il fallait parvenir à augmenter la fréquence des oscillations produites. En 1902, nous avons songé à substituer à l'arc au carbone un arc entre électrodes de mercure placées dans le vide, et nous avons pu obtenir de la sorte des oscillations de grande fréquence. De leur côté, MM. Simon et Reich arrivaient en 1903 à la même idée. Récemment M. Poulsen d'une part et la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie d'autre part sont parvenus à réaliser, sur le principe de l'arc chantant, des appareils suffisamment pratiques pour la production d'oscillations entretenues.

Dans le premier de ces appareils, les deux crayons de charbon de fort diamètre sont placés dans une atmosphère d'hydrogène ou d'un mélange d'hydrogène et d'hydrocarbures (gaz d'éclairage) dans lequel l'arc subit un refroidissement important par suite de la bonne conductibilité calorifique des gaz environnants : un champ magnétique puissant, produit par deux électro-aimants, agit transversalement sur l'arc.

Dans le second appareil, l'arc jaillit entre un cylindre creux en cuivre et un crayon de charbon : le cylindre est refroidi par une circulation d'eau intérieure et le refroidissement de cette électrode permet d'atteindre des fréquences élevées.

M. Benischke a donné une explication plausible des phénomènes qui prennent naissance dans les appareils de Thomson ou de Poulsen. Quand l'arc jaillit entre les sphères de l'éclateur G (fig. 23) ou entre les charbons (fig. 24), le courant ne peut

pas augmenter brusquement jusqu'à la valeur normale J, à cause de la self-induction I : il croît suivant la courbe A, par exemple (fig. 25). Quand le courant a atteint une certaine valeur i, l'action du flux magnétique de l'électro-aimant M, qui est proportionnelle à l'intensité du courant, est assez forte pour rompre l'arc. Le courant ne diminue pas brusquement, par suite de la présence d'une bobine de self-induction I dans le circuit : il décroît suivant la courbe b (fig. 25). Au bout du temps t_1, l'action du flux magnétique de l'électro-aimant étant très faible, puisque le courant est presque nul, l'arc se rallume et le courant croît à nouveau suivant la courbe A_1, pour décroître ensuite suivant la courbe b_1, etc. Le circuit principal est ainsi le siège d'oscillations électriques bb_1b_2... (fig. 25) qui agissent sur le circuit oscillant, accouplé au premier, et le mettent en vibration. La période des oscillations est égale à l'intervalle de temps $(t_1 - t_2)$ indiqué sur la figure 25.

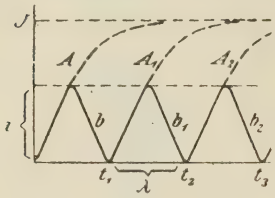


Fig. 25.

Dans l'appareil de la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie, on a recours à un refroidissement énergique, obtenu par la subdivision d'un seul arc en plusieurs arcs successifs, et par l'emploi d'une circulation d'eau. Ce procédé équivaut à l'emploi d'un champ magnétique transversal, en ce qu'il rend l'arc très instable.

CHAPITRE VI

LA RÉSONANCE

Il est nécessaire, pour comprendre les actions qu'exercent entre eux plusieurs circuits oscillants, d'étudier une catégorie de phénomènes généraux, nommés *phénomènes de résonance* par analogie avec certains phénomènes de l'acoustique. Ces phénomènes de résonance se rencontrent dans toutes les applications de la Physique où il s'agit de mouvements vibratoires, et ils jouent toujours un rôle important. Nous commencerons par l'étude de quelques cas relatifs à la mécanique, et nous étendrons ensuite la notion de résonance aux circuits oscillants électriques.

Résonance mécanique.

Considérons un pendule composé d'une petite sphère très pesante fixée à une tige qui peut osciller autour d'un point de suspension. Écartons le pendule de la position verticale et abandonnons-le à lui-même. Il effectue un certain nombre d'oscillations, la sphère dépassant sa position d'équilibre, remontant au delà, s'arrêtant, redescendant pour dépasser à nouveau sa position d'équilibre, etc. Ces oscillations sont amorties, chacune d'elles étant plus petite que la précédente à cause du frottement de l'air sur le pendule et du frottement du point de suspension autour de son axe. Le mouvement du pendule oscillant en liberté présente une certaine fréquence naturelle ou *fréquence propre d'oscillation* f, égale à l'inverse de la période p, ou durée d'une oscillation complète.

Faisons agir maintenant, sur ce pendule qui oscille librement, une force périodique de fréquence f'. Cette force périodique peut être obtenue par l'action intermittente d'un électro-aimant; supposons, pour simplifier, qu'elle consiste en chocs réguliers ou impulsions que l'on imprime avec la main au pendule, à des intervalles de temps égaux ; la fréquence f' d'une telle force périodique est égale au nombre d'impulsions par seconde. Deux cas peuvent se produire ; ou bien la fréquence f' de la force périodique agissante est différente de la fréquence f des oscillations propres du pendule ; ou bien elle lui est égale. Si elle est différente, on se rend compte assez facilement que, après une période transitoire, où la fréquence du mouvement a une valeur mal déterminée, le pendule se met à osciller avec la fréquence de la force périodique qui agit sur lui : on dit qu'il effectue des *oscillations forcées*. *Les oscillations forcées sont d'autant plus petites que la fréquence de la force agissante diffère plus de la fréquence propre d'oscillation du pendule ; elles sont d'autant plus grandes que la fréquence de la force agissante se rapproche plus de la fréquence propre d'oscillation du pendule. Si la fréquence de la force périodique agissante est égale à la fréquence propre d'oscillation*, chacune des impulsions agit pour augmenter l'effet de la précédente, et *les oscillations du pendule deviennent extrêmement grandes*, même pour une valeur très faible de la force périodique agissante. On dit qu'*il y a résonance* entre les oscillations naturelles du pendule libre et la force périodique agissante.

A cet exemple mécanique correspond à peu près celui de la balançoire sur laquelle on fait agir une impulsion périodique provenant du mouvement des jarrets : le système comprenant la balançoire et l'opérateur possède une fréquence propre d'oscillation, et l'on sait fort bien que, pour atteindre une grande hauteur, il faut faire concorder la fréquence des impulsions périodiques avec la fréquence propre d'oscillation.

Un autre exemple est celui d'une troupe d'infanterie traversant au pas cadencé un pont métallique qui possède une certaine élasticité. Si la fréquence de la force périodique agissante (ici la cadence du pas) est différente de la fréquence propre d'oscilla-

tion du pont, ce dernier effectue des oscillations forcées qui sont d'autant plus petites que les fréquences sont plus différentes. Si, par hasard, la fréquence de la force périodique agissante est égale à la fréquence propre du pont, ou en est très voisine, il y a résonance, et les oscillations deviennent tellement grandes que le pont peut se rompre. Dans ce dernier cas, un pont établi, par exemple, pour résister à une charge normale de 5 tonnes peut être rompu par l'action périodique d'une charge de 1 tonne dont la fréquence concorde avec la fréquence propre d'oscillation.

Enfin un dernier exemple de résonance mécanique, qui illustre bien ce phénomène, est le suivant : Dans des essais relativement récents, une compagnie de chemins de fer constata que certains wagons, dont la suspension était excellente aux vitesses inférieures à 85 kilomètres à l'heure et supérieures à 95 kilomètres à l'heure, présentaient des oscillations intolérables pour les vitesses voisines de 90 kilomètres à l'heure. Cela provenait d'un phénomène de résonance, la fréquence des chocs des roues sur les joints de rails étant égale, pour ces vitesses, à la fréquence propre d'oscillation des wagons.

Une application très intéressante du phénomène de résonance a été réalisée dans certains appareils servant à mesurer la fréquence des courants alternatifs (fréquencemètres Hartmann-Kempf). Si l'on fait agir sur une lame élastique en acier le champ magnétique d'un électro-aimant dont la bobine est parcourue par un courant alternatif, cette lame effectue des vibrations dont l'amplitude est d'autant plus grande que la fréquence du courant agissant se rapproche plus de la fréquence propre d'oscillation de la lame. Quand les deux fréquences sont égales, c'est-à-dire quand il y a résonance, l'amplitude des vibrations atteint un maximum très nettement accentué.

Par exemple, en faisant agir sur une lame vibrante, dont la fréquence propre d'oscillation était de 90 périodes par seconde, un électro-aimant dont la bobine était parcourue par un courant alternatif de fréquence variable, on a obtenu photogra-

phiquement la courbe de la figure 26, dans laquelle les longueurs horizontales sont proportionnelles aux valeurs de la fréquence

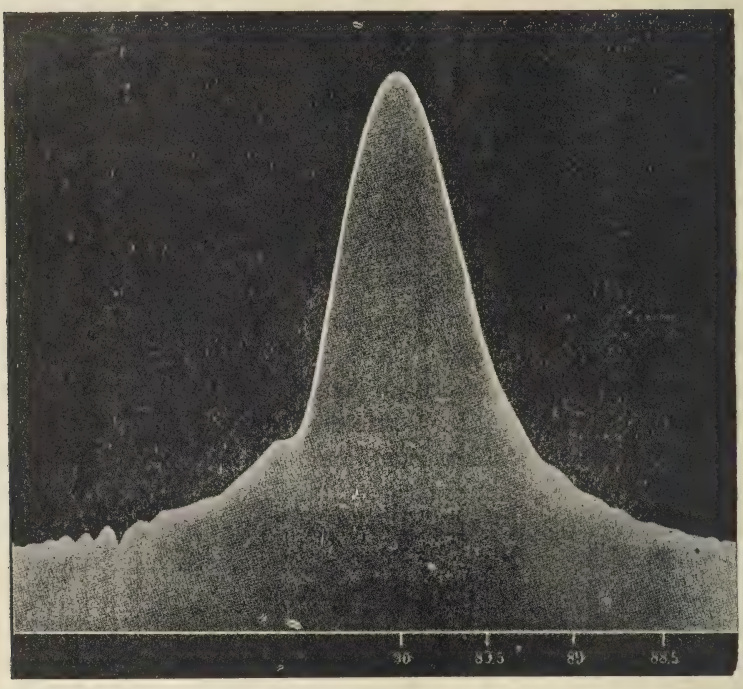


Fig. 26.

du courant alternatif, et les longueurs verticales aux valeurs de l'amplitude des oscillations correspondantes.

Pour réaliser un fréquencemètre basé sur les phénomènes de résonance, on dispose, en face de l'un des pôles d'un électro-aimant (fig. 27) un certain nombre de lames vibrantes présentant des fréquences propres d'oscillation graduellement différentes. Lorsqu'un courant alternatif parcourt la bobine de l'électro-aimant, la lame dont la fréquence propre d'oscillation correspond à la fréquence du courant alternatif, ou les deux lames qui possèdent les fréquences propres les plus voisines de la fréquence du courant alternatif, effectuent des vibrations dont l'amplitude est maxima. Par exemple, on voit sur la

figure 27, d'après les amplitudes de vibration des lames, que la bobine de l'électro-aimant est parcourue par un courant alter-

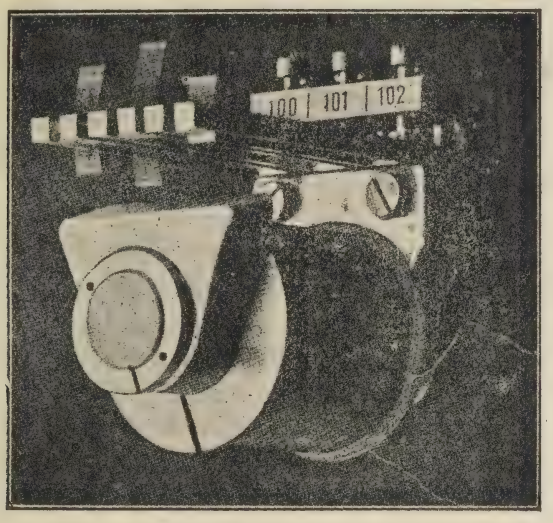


Fig. 27.

natif dont la fréquence est comprise entre 100 et 101 périodes par seconde et se rapproche plus de 101 que de 100.

Les différents exemples qui précèdent montrent nettement les phénomènes de résonance mécanique qui peuvent se produire. D'une façon générale, on peut dire que tout système susceptible d'osciller peut être amené à présenter de très grandes oscillations sous l'effet de très petites forces périodiques, agissant avec une fréquence égale à la fréquence propre d'oscillation du système.

Résonance électrique.

Dans le domaine des oscillations électriques, les phénomènes de résonance jouent un rôle très important et conduisent à des amplifications considérables des oscillations.

Considérons deux circuits oscillants 1 et 2 (fig. 28) contenant chacun un condensateur C_1 ou C_2 et une bobine de self-induction L_1 ou L_2. Ces deux circuits peuvent être accouplés inductivement ensemble, la bobine L_2 étant placée à proximité de la bobine L_1 de façon à embrasser une plus ou moins grande partie des lignes de force émanant de celle-ci. Le circuit 1 (primaire) contient un éclateur E relié au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff ; le circuit 2 (secondaire) contient un appareil de mesure G servant à déterminer l'intensité du courant oscillant qui passe dans le circuit [1] ; le condensateur C_2 est réglable, c'est-à-dire qu'on peut modifier à volonté la valeur de sa capacité. Nous supposons que l'amortissement est très faible dans chacun des circuits oscillants, c'est-à-dire que la résistance électrique de ceux-ci est très minime. Les oscillations électriques qui prennent naissance dans le circuit primaire sont alors des oscillations persistantes.

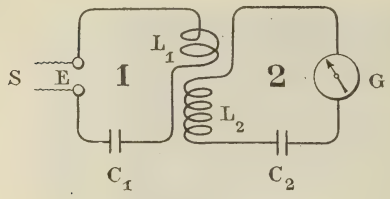


Fig. 28.

Les circuits 1 et 2 possèdent chacun une fréquence propre d'oscillation : c'est la fréquence des oscillations qui prennent naissance lorsque l'un ou l'autre des circuits, n'étant pas accouplé avec le second, est mis en vibration au moyen d'un éclateur alimenté par une bobine de Ruhmkorff. Nous appellerons f_1 la fréquence propre du circuit primaire et f_2 la fréquence propre du circuit secondaire : cette dernière peut être modifiée à volonté par variation de la capacité du condensateur réglable, puisque la fréquence propre d'oscillation d'un circuit dépend de sa capacité et de sa self-induction. Nous supposerons d'abord que la fréquence f_2 est plus grande que la fréquence f_1.

Accouplons inductivement ensemble les deux circuits, comme

---

[1] Cet appareil est, par exemple, un ampèremètre thermique, dans lequel le passage du courant échauffe un fil fin qui se dilate ; l'allongement de ce fil est rendu visible et amplifié au moyen d'un mécanisme quelconque portant une aiguille indicatrice.

le montre la figure 28, et mettons en fonctionnement la bobine de Ruhmkorff pour engendrer dans le circuit primaire des oscillations électriques. La déviation de l'appareil de mesure G indique que le circuit secondaire est le siège d'un courant oscillant : on dit qu'il effectue des *oscillations forcées*. Quand les fréquences propres f_1 et f_2 sont sensiblement différentes, le courant oscillant secondaire a une faible intensité.

Augmentons peu à peu la valeur de la capacité secondaire pour diminuer la fréquence propre f_2 : nous constatons que l'intensité du courant oscillant secondaire, indiquée par l'appareil de mesure, augmente, mais très lentement au début, quand la valeur de la fréquence propre f_2 se rapproche de la fréquence propre f_1. A partir d'un certain moment, lorsque les deux fréquences propres sont assez voisines, l'intensité du courant croît très rapidement quand on augmente la capacité secondaire pour diminuer la fréquence propre f_2. *Quand la fréquence propre f_2 du circuit secondaire est égale à la fréquence propre f_1 du circuit primaire, c'est-à-dire quand les deux circuits sont en résonance, l'intensité du courant oscillant secondaire atteint une valeur maxima,* très élevée par rapport à la valeur qu'elle présentait peu auparavant : les deux circuits en résonance sont dits *accordés* ou *syntonisés*. Si nous continuons à diminuer la valeur de la fréquence propre f_2 (inférieure maintenant à f_1), l'intensité du courant oscillant retombe, d'abord très rapidement, puis de plus en plus lentement.

Si l'on porte sur une horizontale les valeurs de la capacité du circuit secondaire (en unités arbitraires), et sur les verticales correspondantes les intensités du courant oscillant, mesurées par l'appareil G (également en unités arbitraires), on obtient une courbe dont la forme générale est analogue à celle de la figure 29 : une telle courbe est appelée *courbe de résonance* [1]. On voit que, au voisinage de la résonance, une faible variation de la fréquence propre du circuit secondaire produit une très grande variation de l'intensité du courant oscillant

---

[1] On remarquera combien cette courbe, déterminée expérimentalement sur un circuit électrique oscillant, est semblable à la courbe de la figure 26, qui représente la résonance mécanique d'une lame vibrante.

secondaire ; au contraire, une modification de même grandeur relative de la capacité, quand les fréquences f_1 et f_2 diffèrent sensiblement, produit une très faible variation du courant oscillant secondaire.

Si l'on introduit dans le circuit primaire une résistance de valeur relativement élevée, de manière à augmenter l'amortissement, on constate que la résonance est beaucoup moins aiguë, c'est-à-dire que la courbe de la figure 29 s'aplatit et

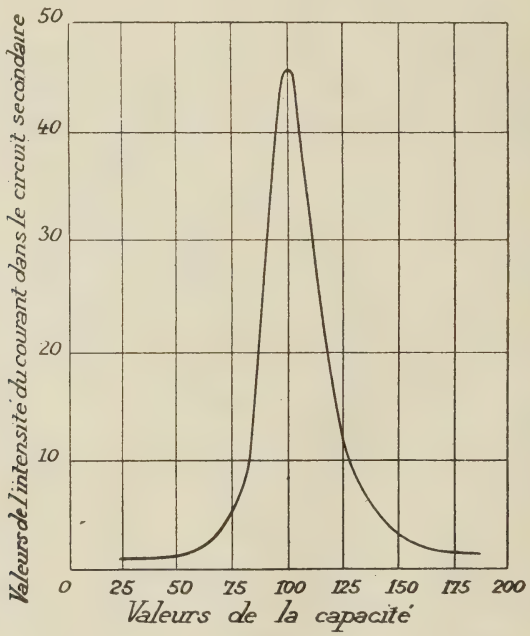


Fig. 29.

s'élargit : cela montre l'intérêt qu'il y a à réduire autant que possible l'amortissement dans les systèmes en résonance.

En examinant la courbe de la figure 29, on voit tout l'intérêt que présente le phénomène de résonance, puisqu'il permet d'obtenir, dans un circuit secondaire accordé, des oscillations dont l'amplitude est infiniment plus grande que dans un circuit secondaire non accordé.

Circuits accouplés inductivement.

Etudions de plus près les phénomènes en jeu dans deux circuits accouplés. Nous avons vu, dans le chapitre relatif aux transformateurs, que l'accouplement inductif entre deux circuits est lâche (imparfait) ou rigide (parfait) suivant qu'une faible partie ou la majeure partie des lignes de force émanant d'un des circuits est embrassée par l'autre circuit. La valeur de l'accouplement est indiquée par le coefficient d'accouplement, égal au quotient du coefficient d'induction mutuelle par le produit des deux coefficients de self-induction. Dans le premier cas (accouplement lâche), le circuit secondaire a une certaine indépendance par rapport au circuit primaire et réagit très peu sur celui-ci. Dans le second cas (accouplement rigide), le circuit secondaire est intimement lié au circuit primaire et réagit fortement sur lui.

1° Supposons d'abord que l'amortissement des deux circuits soit négligeable.

On démontre mathématiquement que, dans le système constitué par deux circuits accouplés, il se produit en général deux groupes simultanés d'oscillations, ayant chacun une fréquence particulière ; les deux fréquences diffèrent des fréquences propres d'oscillation de l'un et l'autre circuit.

Si les circuits sont en résonance, c'est-à-dire s'ils étaient accordés sur la même fréquence avant d'être accouplés ensemble, les fréquences des deux groupes d'oscillations qui prennent naissance sont l'une supérieure et l'autre inférieure à la valeur de la fréquence propre des deux circuits. Les oscillations complexes, résultant de la superposition de ces deux groupes d'oscillations de fréquence différente, présentent des battements et répondent à peu près à la courbe de la figure 30. Si l'accouple-

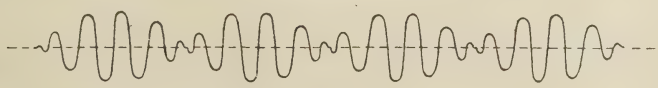


Fig. 30.

ment entre les circuits est rigide, les fréquences des deux groupes d'oscillations diffèrent beaucoup de la fréquence propre

des circuits. Si l'accouplement est lâche, ces deux fréquences ont des valeurs voisines de la fréquence propre commune des circuits et tendent à se confondre pour un accouplement extrêmement lâche [1].

Si les circuits accouplés ne sont pas en résonance, c'est-à-dire s'ils possédaient, avant leur accouplement, des fréquences propres différentes, et si l'accouplement est rigide, les oscillations primaire et secondaire ont une seule fréquence commune, qui est intermédiaire entre les fréquences propres des circuits.

2° Supposons maintenant que les circuits présentent chacun un amortissement non négligeable.

Dans ce cas, le calcul montre que le circuit secondaire est le siège de deux groupes d'oscillations ; les unes, oscillations forcées, ont même fréquence et même amortissement que celles du circuit primaire ; les autres, oscillations libres, ont même fréquence et même amortissement que celles du circuit secondaire. Le courant oscillant dans le circuit secondaire résulte de la combinaison de ces deux groupes d'oscillations de fréquences différentes et d'amortissements différents. Plusieurs cas particuliers peuvent se présenter.

a) Les deux circuits sont complètement accordés, c'est-à-dire qu'ils ont même fréquence propre et même amortissement. Dans ce cas, les oscillations du circuit secondaire vont en croissant jusqu'à une certaine valeur qu'elles conservent (fig. 31).

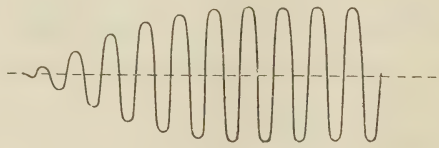


Fig. 31.

b) Les deux circuits ont même fréquence propre, mais n'ont pas le même amortissement. Dans ce cas, les oscillations du circuit secondaire croissent d'abord jusqu'à une certaine valeur,

(1) Ces deux cas, importants pour la pratique de la télégraphie sans fil, sont envisagés dans le chapitre IX, où la description d'un modèle mécanique facilite la compréhension des phénomènes en jeu.

sensiblement plus faible que dans le cas précédent, puis décroissent peu à peu (fig. 32).

c) Les deux circuits ont des fréquences propres différentes

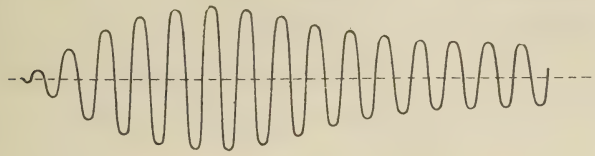


Fig. 32.

et des amortissements égaux ou différents. Les oscillations résultantes du circuit secondaire vont en croissant jusqu'à une valeur maxima, puis décroissent jusqu'à zéro pour croître à nouveau, et présentent des battements analogues à ceux qu'indique la figure 30 : à cause de l'amortissement, l'amplitude des oscillations maxima dans chaque battement va en diminuant. Ce dernier cas n'a pas d'intérêt en pratique, puisqu'on place toujours les circuits dans les conditions de résonance, ou tout au moins très près de ces conditions, pour obtenir le maximum d'effet.

Transformateurs pour oscillations électriques.

Les bobines L_1 et L_2 des circuits accouplés de la figure 28 réalisent un transformateur. En télégraphie sans fil, on fait très fréquemment usage de tels transformateurs, avec accouplement lâche ou rigide, pour exciter inductivement un circuit oscillant au moyen d'un autre. On appelle souvent ces appareils des transformateurs Tesla, du nom de M. Nikola Tesla qui, le premier, en a fait usage pour la production d'oscillations électriques.

Les actions réciproques qu'exercent l'un sur l'autre les deux enroulements parcourus par des oscillations électriques sont différentes de celles qui se manifestent dans les transformateurs ordinaires pour courants de basse fréquence, car, ici, les circuits sont généralement accordés ou syntonisés, c'est-à-dire qu'ils sont en résonance. *Si le transformateur a un accouplement*

lâche et si les deux circuits, présentant un amortissement négligeable, sont en résonance, le **rapport de transformation** *ne dépend pas du rapport des nombres de tours des bobines* L_1 *et* L_2 ; *il dépend seulement du* **rapport des capacités** *des deux circuits. Si, au contraire, l'accouplement est rigide et si les deux circuits ne sont pas accordés, le rapport de transformation dépend, comme pour les transformateurs ordinaires à basse fréquence, du rapport des nombres de tours secondaires et primaires.*

Circuits accouplés directement.

Deux circuits oscillants peuvent être accouplés directement. Soient par exemple les circuits oscillants 1 et 2 (fig. 33) qui ont une portion commune AB. Le circuit 1 contient un éclateur E, un condensateur C_1 et une bobine de self-induction L_1 : le circuit 2 contient un condensateur C_2 et une bobine de self-induction L_2. Si l'on met en vibration le circuit 1, en reliant l'éclateur E au secondaire d'une bobine d'induction, le circuit 2 entre aussi en vibration et effectue des oscillations forcées. En modifiant la valeur de la capacité ou de la self-induction de ce circuit, on peut l'amener à être en résonance avec le circuit 1, et l'on constate alors que les oscillations engendrées atteignent une amplitude maxima, comme dans le cas de l'accouplement inductif.

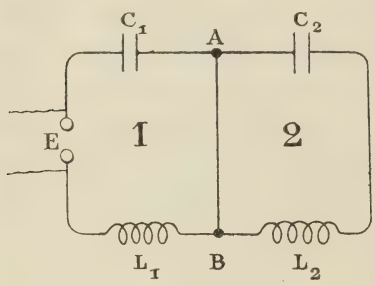


Fig. 33.

Soit R (1) la résistance de la portion commune AB. Si cette résistance a une faible valeur, la différence de potentiel entre les points A et B est faible, pour une intensité donnée *i* du courant oscillant primaire (2). Dans ces conditions, l'accouplement entre les deux circuits est lâche (imparfait).

(1) La résistance R comprend, bien entendu, la résistance ohmique (réelle) et la résistance inductive (apparente) : sa valeur est la résultante des valeurs de ces deux résistances.

(2) Nous avons vu, au chapitre III (page 22) que, dans un circuit, l'intensité

Si, au contraire, la résistance R de la portion commune AB a une valeur élevée, c'est-à-dire représente une part importante de la résistance totale du circuit 1 (ce qui a lieu par exemple, si la majeure partie de la self-induction est contenue dans la portion AB, sous forme d'une bobine L, fig. 34), la différence de potentiel entre les points A et B a une valeur élevée, et l'accouplement entre les deux circuits est rigide.

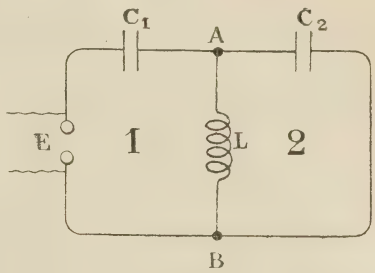


Fig. 34.

Nous avons rencontré déjà, dans les dispositifs capables de produire des oscillations entretenues (fig. 23 et 24), un exemple de circuits oscillants accouplés directement. Dans ces dispositifs, le circuit oscillant a, avec le circuit principal, une portion commune contenant l'éclateur ou l'arc électrique.

---

du courant est proportionnelle à la différence de potentiel agissante et inversement proportionnelle à la résistance du circuit, c'est-à-dire que l'on a

$$i = \frac{e}{R} \quad \text{ou} \quad e = Ri.$$

Sous la seconde forme, cette égalité montre que, quand une portion de conducteur de résistance R est parcourue par un courant d'intensité i, la différence de potentiel entre les extrémités de cette portion de conducteur est égale au produit de la résistance par l'intensité du courant. Plus la résistance est grande, et plus la différence de potentiel est élevée.

CHAPITRE VII

PRODUCTION ET PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES. — EXPÉRIENCES DE HERTZ

Comme nous l'avons vu au début, H. Hertz a fait, il y a vingt ans, une découverte d'une importance capitale en parvenant à produire, au moyen d'oscillations électriques, un ébranlement périodique de l'éther, et en vérifiant que les rayons électriques qui prennent ainsi naissance obéissent aux mêmes lois que les rayons lumineux, les uns et les autres représentant la propagation d'ondes électromagnétiques.

Excitateur ou oscillateur.

Les circuits oscillants dont il a été question dans le chapitre précédent ne peuvent pas communiquer à l'éther qui les entoure un ébranlement intense, parce que ces circuits sont fermés sur eux-mêmes et que, sauf au voisinage du petit intervalle explosif de l'éclateur et dans la lame isolante très mince du condensateur, il n'existe dans l'espace environnant aucune ligne de force électrique. Pour obtenir des phénomènes de radiation, il faut employer non plus un circuit fermé, mais un circuit ouvert produisant des lignes de force électriques qui embrassent une certaine portion de l'espace, comme nous allons le voir.

L'excitateur ou oscillateur, utilisé par Hertz dans ses premières expériences, comprenait deux sphères métalliques A et B de 30 centimètres de diamètre situées à $1^m,50$ l'une de l'autre (fig. 35). Un conducteur de 5 millimètres de diamètre, interrompu en *ab* par un éclateur, reliait ces deux sphères. Les deux

boules de l'éclateur étaient connectées au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. Un tel système forme un *circuit oscillant ouvert.*

Les circuits oscillants fermés que nous avons étudiés précédemment comprennent une certaine self-induction, concentrée

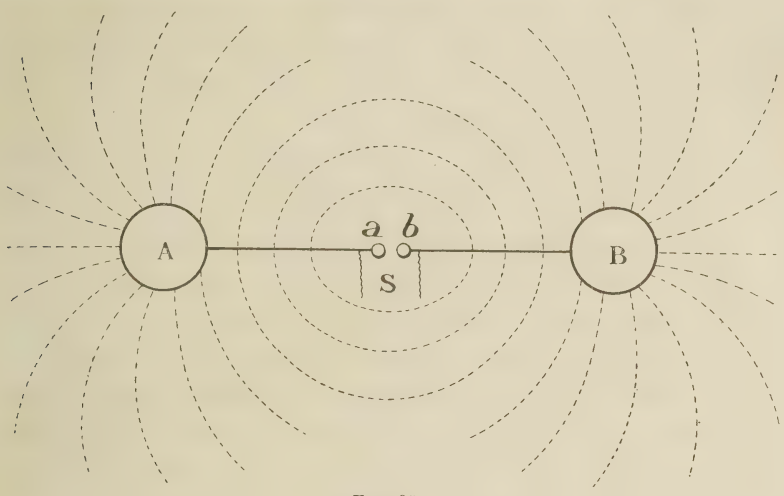


Fig. 35.

dans une bobine, et une certaine capacité, concentrée dans un condensateur. Dans le circuit ouvert, dont il s'agit maintenant, la self-induction est réduite à celle des conducteurs, et la capacité est celle des deux sphères, qui forment, en quelque sorte, les deux armatures d'un condensateur.

Dans ces conditions, lorsque le système se charge sous l'effet de la différence de potentiel secondaire de la bobine, l'espace situé tout autour de l'excitateur est le siège de lignes de force électriques qui relient l'une des moitiés du circuit, chargée par exemple au potentiel +, à l'autre moitié, chargée au potentiel —. Une partie de ces lignes de force est représentée schématiquement par des lignes pointillées sur la figure 35. Quand la charge a atteint une valeur suffisante, une étincelle jaillit entre les boules *ab* de l'éclateur. A ce moment, une série d'oscillations électriques prend naissance dans le circuit, par suite des modifications alternatives de l'énergie en jeu, qui passe de la forme électrostatique à la forme électrocinétique et inverse-

ment, comme nous l'avons vu en détail dans le chapitre précédent. Les lignes de force qui existent dans l'espace autour de l'excitateur subissent alors des oscillations correspondantes, puisque le potentiel de chaque moitié du système s'inverse périodiquement. Il en résulte un ébranlement violent de l'éther, et cet ébranlement donne naissance à une perturbation qui se propage sous forme d'une onde électromagnétique. Le phénomène par lequel le circuit ouvert A*ab*B engendre des ondes électromagnétiques est appelé *radiation*.

En étudiant les circuits oscillants fermés, nous avons vu que toute perte d'énergie entraîne un amortissement des oscillations électriques produites. Comme perte d'énergie dans ces circuits, on n'a guère à considérer que celle due à la résistance électrique du circuit total, y compris l'étincelle. Dans les circuits oscillants ouverts, tels que l'excitateur de Hertz, il se produit en outre une perte [1] très importante d'énergie par suite de la radiation. Par conséquent, les oscillations électriques qui prennent naissance dans un tel circuit sont *fortement amorties* et les ondes électromagnétiques qu'elles engendrent sont elles-mêmes amorties et d'une nature complexe.

Il ne faut pas croire qu'il existe une différence marquée entre les circuits oscillants fermés et les circuits oscillants ouverts. Si l'on éloigne progressivement l'une de l'autre les deux armatures du condensateur d'un circuit fermé, on passe peu à peu au cas du circuit ouvert. Quand la distance entre les deux armatures est faible par rapport aux dimensions de celles-ci, le circuit doit être considéré comme fermé ; quand la distance entre les armatures est grande par rapport à leurs dimensions, le circuit agit comme un excitateur de Hertz.

La fréquence des oscillations dépend toujours des valeurs de la capacité et de la self-induction. Dans l'oscillateur de Hertz

---

[1] Cette énergie est *perdue pour le circuit*, mais ce n'est pas de l'énergie réellement perdue, puisqu'elle reparaît sous forme d'ondes électromagnétiques que l'on utilise. Il n'en est pas de même de l'énergie absorbée par la résistance du circuit, qui est dépensée en pure perte pour échauffer les conducteurs de ce circuit. Pour les applications de la télégraphie sans fil, par exemple, on s'attache à augmenter le plus possible la première perte et à diminuer autant que possible la seconde.

qui vient d'être décrit, les oscillations électriques avaient une fréquence de 56 millions par seconde environ. La longueur d'onde des ondes électromagnétiques produites était donc de $5^{m},35$ environ.

Afin d'obtenir des oscillations de plus grande fréquence et, par suite, des ondes de plus faible longueur d'onde, Hertz a réduit le plus possible la capacité et la self-induction dans un petit excitateur qui lui a servi pour un certain nombre d'expériences. Cet appareil (fig. 36) était constitué simplement par deux cylindres métalliques, d'une douzaine de centimètres de longueur et de trois centimètres de diamètre, arrondis à une extrémité et placés dans le prolongement l'un de l'autre. Chacun d'eux était relié à l'une des extrémités du secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. Les oscillations produites par cet excitateur avaient une fréquence de 450 millions par seconde ; les ondes engendrées avaient donc une longueur d'onde de $66^{cm},5$ environ.

Fig. 36.

Différents savants, continuant les travaux de Hertz, se sont efforcés d'augmenter encore la fréquence des oscillations produites. M. Righi a employé pour cela un excitateur composé uniquement de deux petites sphères métalliques de 8 millimètres de diamètre placées à 1 millimètre environ l'une de l'autre et immergées dans l'huile. Il a pu obtenir ainsi des fréquences de 12 milliards par seconde, c'est-à-dire des ondes de $2^{cm},5$ de longueur d'onde. M. Böse est descendu plus bas et a obtenu des longueurs d'onde de 6 millimètres ; enfin M. Lebedew a obtenu des longueurs d'onde de 4 millimètres. La très faible intensité des oscillations d'aussi grande fréquence et l'extrême petitesse des effets qu'elles produisent rendent très difficile leur observation [1].

Résonateur.

Pour pouvoir étudier la propagation du mouvement vibra-

[1] En effet, la quantité d'énergie en jeu dans un circuit est proportionnelle à la capacité de ce circuit. Pour obtenir de grandes fréquences d'oscillation, il faut réduire la capacité ; on réduit donc en même temps la quantité d'énergie en jeu.

toire créé par son excitateur, il fallait à Hertz un appareil susceptible d'être influencé par les ondes électromagnétiques et de les déceler. Cet appareil, nommé *résonateur,* consistait simplement en un circuit oscillant formé d'une boucle de fil interrompue en un point par un éclateur dont les deux boules étaient très rapprochées (fig. 37). Quand un tel résonateur est mis en vibration par l'action du mouvement vibratoire de l'éther, des étincelles jaillissent entre les deux boules sous l'effet de la différence de potentiel qui existe entre elles [1]. Évidemment, cet effet est maximum si le résonateur a pour fréquence propre d'oscillation la fréquence du mouvement vibratoire, qui est elle-même égale à la fréquence propre d'oscillation de l'excitateur.

Fig. 37.

Le résonateur constitue un *détecteur d'ondes* d'une sensibilité assez faible, mais néanmoins suffisante pour les expériences que Hertz avait à réaliser. Au lieu d'introduire dans le résonateur une coupure, on pourrait avantageusement y intercaler un appareil de mesure.

Afin d'éviter toute confusion, il faut bien remarquer que l'action à distance produite par l'excitateur sur le résonateur ne provient pas de l'induction mutuelle des deux circuits telle que nous l'avons étudiée précédemment. L'excitateur donne naissance à un mouvement vibratoire de l'éther qui se propage par rayonnement sous forme d'une onde électromagnétique : ce mouvement vibratoire met à son tour en vibration le résonateur qui se trouve sur le trajet de l'onde.

D'après ce qui a été dit précédemment sur l'amortissement, on voit que les vibrations ou oscillations électriques du résonateur de Hertz sont peu amorties, puisque la seule perte d'énergie dans ce circuit provient de sa résistance, toujours très faible.

---

[1] Il peut exister une différence de potentiel entre ces deux boules, bien qu'elles soient reliées métalliquement entre elles, parce qu'il ne s'agit pas ici d'un régime permanent. Les oscillations électriques rencontrent, dans le conducteur métallique qui relie les deux boules, une *résistance inductive* d'autant plus grande que la fréquence est plus grande. C'est à cause de cette résistance inductive, dont l'existence a été expliquée à la fin du chapitre IV, qu'il peut exister entre les boules une certaine différence de potentiel quand le résonateur est en vibration.

Or les oscillations de l'excitateur sont fortement amorties, à cause de la radiation. Dans ces conditions, les vibrations ou oscillations électriques qui prennent naissance dans le résonateur ont pour fréquence la fréquence propre d'oscillation de ce circuit, et non la fréquence des oscillations de l'excitateur. Si donc les deux circuits n'ont pas été accordés sur la même fréquence, il ne faut pas compter pouvoir déterminer, avec le résonateur, la fréquence des oscillations de l'excitateur ou la longueur d'onde réelle de la perturbation produite par celui-ci dans l'éther.

Certaines modifications ont été apportées au résonateur de Hertz par différents expérimentateurs : c'est ainsi que M. Blondlot a intercalé un condensateur dans la boucle de fil qui le constitue : il se servait d'ailleurs du même circuit comme excitateur, en reliant les deux boules au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. M. Righi, pour obtenir un appareil d'une très grande sensibilité, afin de déceler les ondes de son excitateur à grande fréquence, a employé comme résonateur une couche mince d'argent déposée sur une feuille de verre et ayant la forme d'un rectangle allongé ; cette couche était rayée transversalement par un trait de diamant extrêmement étroit, et l'on observait au microscope les étincelles qui jaillissaient entre les deux bords.

Actuellement, on possède des détecteurs d'ondes infiniment plus sensibles que le résonateur ; ces appareils reposent sur différents phénomènes et seront étudiés dans la suite.

Propagation des ondes électromagnétiques dans l'espace. Réflexion, réfraction et interférence.

En se servant du résonateur, Hertz put étudier la propagation des ondes dans l'air et constater que cette propagation obéit aux principales lois de l'Optique. Nous allons rappeler brièvement quelques-unes de ses expériences.

Réflexion. — Pour étudier la réflexion des ondes, Hertz prit deux surfaces paraboliques en zinc de 2 mètres de hauteur et de

$1^m,20$ d'ouverture qui devaient servir de miroirs pour concentrer en un faisceau parallèle les rayons électriques.

L'un de ces miroirs contenait, suivant son axe focal (fig. 38), le petit excitateur à tiges ; l'autre contenait, suivant son axe focal, un résonateur ouvert rectiligne formé de deux fils A et B reliés à un petit éclateur *a*. En plaçant les deux appareils en face l'un de l'autre et en mettant en fonctionnement l'excitateur, Hertz constata que les surfaces de zinc agissaient bien comme des miroirs vis-à-vis des rayons électriques et que ceux-ci étaient concentrés en un faisceau parallèle. En effet, quand les deux miroirs étaient disposés exactement en face l'un de l'autre, des étincelles apparaissaient à la coupure *a* du résonateur ; dès qu'on tournait autour de son axe l'un des deux miroirs, cette action cessait.

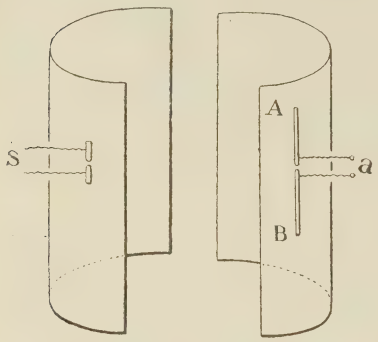


Fig. 38.

Hertz vérifia ensuite que, quand les rayons tombent obliquement sur une surface métallique, ils sont réfléchis suivant un angle égal à l'angle d'incidence, comme les rayons lumineux. Pour cela il dirigea sur une grande feuille métallique FF′ le faisceau de rayons parallèles émanant du miroir parabolique de l'excitateur E, et il constata que, pour recueillir sur le résonateur R les rayons réfléchis, il fallait placer le miroir parabolique de celui-ci dans une position telle que l'angle de réflexion β fût égal à l'angle d'incidence α (fig. 39).

Toute surface métallique agit donc bien comme un miroir vis-à-vis des rayons électriques, et les lois sont les mêmes que celles auxquelles obéissent les rayons lumineux.

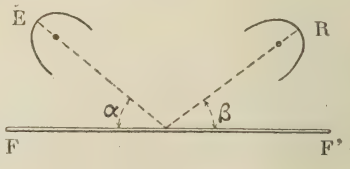


Fig. 39.

Réfraction. — Les lois de la réfraction purent être vérifiées de la même manière : Hertz prit un prisme en substance isolante (résine ou asphalte) de

$1^m,50$ de côté, et l'intercala entre les deux miroirs de la figure 38. Il constata (fig. 40), en déplaçant le résonateur jusqu'à ce que celui-ci fût impressionné par les rayons électriques, que ces rayons avaient subi dans le prisme une réfraction semblable à celles que subissent les rayons lumineux dans un prisme en verre.

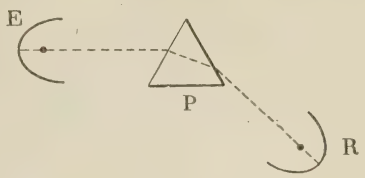


Fig. 40.

Interférence. — Quand un rayon lumineux ou un rayon électrique tombe sur un miroir auquel il est perpendiculaire, il se réfléchit sur lui-même et revient en arrière. Le résultat produit est le même que si deux rayons, suivant le même chemin mais en sens inverse, se superposaient l'un à l'autre. Le premier rayon, qui va vers le miroir, est dit rayon incident ; le second rayon, venant du miroir, est dit rayon réfléchi. Chaque rayon représentant la direction de propagation d'un mouvement vibratoire, on voit qu'*il y aura superposition de deux mouvements vibratoires de même fréquence et de même amplitude progressant en sens inverse*. Par conséquent, chaque particule d'éther, située primitivement sur le chemin du rayon incident, va se trouver soumise à un mouvement résultant de la combinaison des deux mouvements vibratoires qui agissent simultanément sur elle. Les phénomènes auxquels donne lieu la combinaison des deux mouvements vibratoires s'appellent *phénomènes d'interférence*.

Soit AB (fig. 41) la ligne perpendiculaire au miroir M, suivant laquelle progressent, en sens inverse, les deux mouvements vibratoires dont il vient d'être question. Appelons I le premier mouvement, qui progresse dans la direction AB, et II le second mouvement, qui progresse dans la direction BA. Considérons une particule d'éther située primitivement sur la ligne AB et étudions le mouvement résultant auquel cette particule va être soumise. Du fait de la propagation du mouvement vibratoire I, la particule doit se déplacer suivant une perpendiculaire à AB en effectuant un mouvement vibratoire harmonique. Du fait de la propagation du mouvement vibratoire II, la particule doit se déplacer encore suivant la même

perpendiculaire en effectuant un second mouvement vibratoire harmonique. Ces deux mouvements vont se composer en un

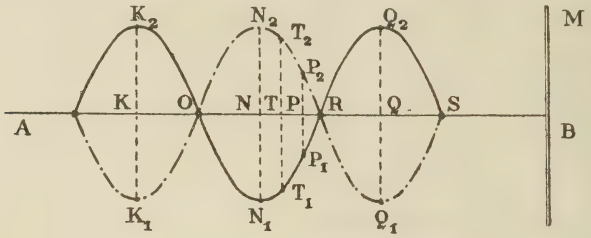


Fig. 41.

mouvement résultant dont l'amplitude dépendra de la différence des phases des deux mouvements composants. Si ceux-ci ont la même phase [1], ils sont concordants et leurs effets s'ajouteront : la particule sera soumise alors à un mouvement vibratoire d'amplitude double de celle des mouvements composants. Si, au contraire, les phases des mouvements I et II sont égales et opposées, ces deux mouvements se détruiront l'un l'autre à chaque instant et la particule restera toujours immobile. Si enfin les phases des deux mouvements diffèrent d'une quantité quelconque, la particule effectuera un mouvement vibratoire dont l'amplitude dépendra de la valeur de la différence des phases : cette amplitude sera d'autant plus grande ou d'autant plus petite que les phases se rapprocheront plus de la concordance ou de la discordance. Dans tous les cas, la fréquence du mouvement résultant sera égale à la fréquence commune des mouvements vibratoires I et II.

En un point donné P, la différence des phases des mouvements vibratoires I et II conserve toujours une valeur constante qui dépend de la position du point P par rapport à l'origine A du rayon. L'amplitude du mouvement vibratoire qu'effectue la particule *p*, située primitivement au point P, est donc bien déterminée : elle aura, par exemple, pour valeur PP_1. Considérons les particules successives qui sont à la droite de *p* : quand on va vers B, la phase du mouvement vibratoire I aug-

---

[1] La notion de phase a été expliquée dans le chapitre II, page 10.

mente (puisqu'on s'éloigne de l'origine A), et la phase du mouvement vibratoire II diminue (puisqu'on se rapproche de l'origine B). L'une des phases augmentant, et l'autre diminuant [1], la différence des phases des deux mouvements composants varie rapidement quand on passe d'une particule à la suivante, et, par conséquent, l'amplitude du mouvement vibratoire de chaque particule diffère sensiblement de celle du mouvement vibratoire de la particule précédente. On arrivera donc assez vite à une particule pour laquelle cette amplitude sera maxima (les phases des mouvements vibratoires I et II étant égales et concordantes) ou nulle (les phases des mouvements vibratoires I et II étant égales et opposées). Soit *r* cette particule, située au point R.

Considérons les particules situées en O et S de part et d'autre du point R à une distance d'une demi-longueur d'onde. D'après ce qui a été dit au chapitre I, page 10, les phases des mouvements de deux particules distantes d'une demi-longueur d'onde dans chacun des mouvements vibratoires I et II sont égales et opposées. Donc, puisque les phases se sont inversées dans chacun des mouvements vibratoires I et II, elles sont encore égales et concordantes (ou opposées) en O et en S si elles étaient égales et concordantes (ou opposées) en R. De même pour les points situés à 1, 3/2, 5/2, 7/2... longueur d'onde de part et d'autre du point R. *Si les phases sont opposées, les particules situées aux points* O, R, S, *etc., restent immobiles ; ces points sont appelés des* **nœuds**. *Si au contraire les phases sont concordantes, les particules situées en* O, R, S, *etc., effectuent des mouvements périodiques dont l'amplitude a une valeur double de celle des mouvements* I *et* II. *Ces points sont appelés des* **ventres**. Il est facile de voir qu'à mi-distance entre deux nœuds, il existe toujours un ventre, et qu'à mi-distance entre deux ventres il existe toujours un nœud. *Deux nœuds ou deux ventres successifs sont séparés l'un de l'autre par une distance égale à une demi-longueur d'onde*, comme on vient de le voir : *un ventre et un nœud voisins sont séparés par une distance égale à un quart de*

---

[1] L'augmentation de l'une est d'ailleurs égale à la diminution de l'autre.

longueur d'onde. L'ensemble des nœuds et des ventres forme une onde stationnaire.

Il faut bien se garder de confondre les mouvements vibratoires qu'effectuent les particules successives dans une onde qui se propage (chapitre I) ou dans une onde stationnaire comme celle dont nous venons de déterminer l'existence. Dans la première, chaque particule effectue un mouvement de même amplitude que celui de la particule voisine, et il se produit une sorte de déplacement latéral de l'onde [1] : ici chaque particule effectue un mouvement dont l'amplitude est différente de celle du mouvement de la particule voisine. Les particules *o, r, s*, situées par exemple en des nœuds O, R, S (fig. 41), sont immobiles ; les mouvements des particules *k, n, q*, situées en des ventres K, N, Q, ont une amplitude $2a$, en appelant a l'amplitude de l'un des mouvements périodiques composants. Le mouvement de la particule *p*, située en P, a une amplitude PP_1 ; celui de la particule *t*, située en T, a une amplitude TT_1. *La position des nœuds et des ventres est invariable dans l'espace.*

En employant un excitateur qui comprenait, au lieu de sphères, deux plaques carrées de 1 600 centimètres carrés, et en plaçant parallèlement à cet appareil une grande feuille métallique, Hertz constata, au moyen d'un résonateur, que les rayons électriques donnent lieu aux mêmes phénomènes d'interférence que les rayons lumineux, et qu'il se produit une onde stationnaire présentant des nœuds et des ventres. En réalité, ces expériences n'étaient pas concluantes, parce qu'un phénomène complexe intervenait à cause de la grande différence des valeurs de l'amortissement dans le résonateur et dans l'excitateur : elles ont été reprises depuis, et les résultats fondamentaux ont été reconnus exacts.

Propagation des ondes électromagnétiques dans les fils.

Si l'on fait agir sur un fil ouvert [2] les oscillations produites

---

[1] Ce déplacement est bien visible sur les figures 2, 3, 4, 5 du chapitre I.
[2] C'est-à-dire dont l'extrémité est isolée.

par un excitateur, la perturbation créée dans ce fil se propage, et se réfléchit sur l'extrémité du fil : la perturbation directe et la perturbation réfléchie interfèrent et donnent lieu à une *onde stationnaire* qui présente des nœuds et des ventres.

Le courant étant forcément nul à l'extrémité libre du fil [1] puisqu'il ne peut y avoir d'accumulation d'électricité en ce point, *il y a un nœud de courant à cette extrémité.* Donc il y aura d'autres nœuds de courant à des distances $\lambda/2$, λ, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$..., etc. de l'extrémité, λ étant la longueur d'onde de la perturbation. Puisqu'il y a un nœud de courant à l'extrémité du fil, nous savons qu'*il y aura un ventre de courant à une distance $\lambda/4$ de l'extrémité,* et d'autres ventres de courant aux distances $3\lambda/4$, $5\lambda/4$, $7\lambda/4$... de l'extrémité.

On montre mathématiquement et on vérifie expérimentalement que l'*onde de courant et l'onde de potentiel qui se propagent dans le fil ne sont pas en phase. Leurs phases diffèrent d'un quart de période.* L'onde de potentiel présente aussi des nœuds et des ventres, mais, puisque les deux ondes ont une différence de phase d'un quart de période, *les ventres de potentiel se trouvent aux points où il existe des nœuds de courant, et les nœuds de potentiel se trouvent aux points où il existe des ventres de courant* [2]. Ce phénomène est absolument analogue à celui que présentent, en Acoustique, les vibrations de l'air dans un tuyau sonore fermé à une extrémité. Le potentiel, ou la tension électrique, est analogue à la pression de l'air, et le courant électrique est analogue à la vitesse de l'air. Aux ventres de vibration, où la pression est forte, la vitesse de l'air est nulle ; aux nœuds de vibration, où la pression est nulle, la vitesse de l'air est maxima. D'après ce qui a été dit précédemment, on voit que

---

[1] A moins que celle-ci n'aboutisse à une capacité.

[2] En effet, si l'onde de potentiel et l'onde de courant étaient en phase, les ventres de potentiel et les ventres de courant se trouveraient aux mêmes points. Mais puisque les phases de l'onde de potentiel et de l'onde de courant diffèrent d'un quart de période, l'onde de potentiel se trouve d'un quart de longueur d'onde en arrière de l'onde de courant : donc les ventres de potentiel se trouvent à un quart de longueur d'onde en arrière des ventres de courant, c'est-à-dire qu'ils sont aux mêmes points que les nœuds de courant. De même les nœuds de potentiel, qui sont à un quart de longueur d'onde des ventres de potentiel, se trouvent aux mêmes points que les ventres de courant.

l'amplitude du mouvement vibratoire à un ventre de tension est double de la valeur maxima de la tension alternative agissante.

Pour étudier la propagation le long des fils, Hertz, puis M. Lecher et MM. Sarrasin et de la Rive, ont employé le dispositif suivant (fig. 42).

L'excitateur comprend deux plaques métalliques carrées A et B reliées par un conducteur interrompu en son milieu par un éclateur E. En face des deux plaques A et B sont disposées deux plaques A′ et B′ formant avec elles deux condensateurs. Chacune de ces plaques est reliée à un fil, et les deux fils, soigneusement isolés à leur extrémité, sont tendus parallèlement l'un à l'autre. Il se produit le long de ces fils des nœuds et des ventres de tension et de courant : un tube vide d'air (tube de Geissler par exemple), placé transversalement entre les deux fils, devient très lumineux aux points où il existe des ventres de tension, et reste complètement obscur aux points où il existe des nœuds de tension. Au lieu d'un tube à vide, on peut employer d'autres appareils appropriés. Les nœuds et les ventres de courant peuvent être mis en évidence si l'on intercale dans l'un des fils, en des points variables, un appareil de mesure (ampèremètre thermique par exemple) ou simplement une lampe électrique à incandescence dont le filament rougit aux points où il y a des ventres de courant et reste obscur aux points où il y a des nœuds de courant.

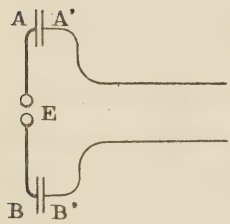


Fig. 42.

M. Blondlot, qui s'était proposé de mesurer la vitesse de propagation des ondes dans les fils, excitait ceux-ci par induction électromagnétique avec le dispositif que représente la figure 43. Dans ce dispositif, un excitateur circulaire agit sur un fil qui l'entoure à très faible distance et dont les deux extrémités sont tendues parallèlement l'une à l'autre : la self-induction d'un tel circuit circulaire peut être exactement déterminée par le calcul ; de même, la capacité du condensateur intercalé dans ce circuit est connue. On peut donc, connaissant la valeur du produit CL (capacité et self-induction), déterminer exactement la fréquence

des oscillations produites. D'autre part, on peut déterminer sur le fil la distance $\lambda/2$ qui sépare deux nœuds ou deux ventres et en déduire la valeur de la longueur d'onde λ. Or, comme nous l'avons vu à la fin du chapitre I, la vitesse de propagation v, la fréquence f et la longueur d'ondes λ sont liées par la relation

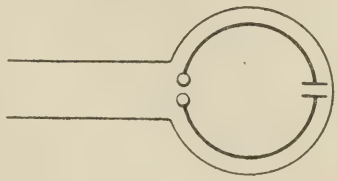


Fig. 43.

$$v = \lambda f.$$

On peut par conséquent déterminer ainsi la valeur de v.

Ces expériences, complétées par celles de MM. Trowbridge et Duane [1], ont conduit à trouver pour la vitesse de propagation dans les fils la même valeur que pour la vitesse de propagation dans l'air, soit 300 000 kilomètres par seconde, vitesse de la lumière.

---

[1] Ces expérimentateurs déterminaient la fréquence des oscillations au moyen d'un miroir tournant, d'après la méthode expliquée au chapitre V.

CHAPITRE VIII

LES DÉBUTS DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Les expériences de Hertz, décrites dans le chapitre précédent, permettent de réaliser des actions à distance et peuvent servir à la transmission de signaux, puisqu'un appareil récepteur est impressionné par un appareil transmetteur dont les oscillations sont engendrées à volonté pendant un intervalle de temps plus ou moins long. Mais l'énergie propagée par les ondes ainsi créées est très faible et, en outre, le résonateur constitue un détecteur d'ondes extrêmement peu sensible : on ne pouvait donc pas songer à établir des communications à distance avec ce système avant d'avoir trouvé d'une part un détecteur d'ondes assez sensible, et d'autre part un radiateur suffisamment puissant.

Radioconducteur de M. Branly.

Plusieurs expérimentateurs, parmi lesquels on peut citer Varley [1], avaient signalé qu'un tube rempli de limailles métalliques ou d'un mélange de poudres métalliques et de poudres non conductrices présente une résistance électrique extrêmement élevée lorsque ses extrémités sont soumises à une faible différence de potentiel, et une résistance électrique très faible lorsque la différence de potentiel agissante est grande. D'autre part, le Pr Hughes s'aperçut, dans des expériences

---

[1] Les frères Varley avaient établi sur ce principe, en 1866, un parafoudre pour appareils télégraphiques.

faites vers 1880, que la résistance d'un contact microphonique entre acier et charbon diminuait considérablement sous l'influence d'étincelles voisines. Enfin le Pr Branly signala, en 1890, que, d'après un grand nombre d'observations faites par lui, *la résistance électrique d'une colonne de limaille métallique comprise entre deux électrodes métalliques est grandement influencée, à distance, par les étincelles d'une bobine de Ruhmkorff*. Parmi les limailles étudiées par ce savant, la majorité présentait une diminution de résistance et quelques-unes présentaient une augmentation de résistance. L'appareil de M. Branly, nommé *radioconducteur* par son inventeur, consistait en un tube de verre T (fig. 44) contenant deux cylindres métalliques EE dont les surfaces intérieures extrêmes étaient soigneusement polies : entre ces deux surfaces était placée la limaille métallique. Les fils F et F′, aboutissant aux deux électrodes EE′, étaient reliés à une pile et à un appareil de mesure. En temps normal, aucun courant appréciable ne traversait le circuit, à cause de la résistance élevée de la limaille L comprise entre les cylindres E et E′ ; dès que l'étincelle de décharge d'une bobine de Ruhmkorff ou d'une bouteille de Leyde éclatait à quelque distance du radioconducteur, la résistance électrique de la limaille métallique L diminuait brusquement et l'appareil de mesure indiquait le passage d'un courant relativement important. M. Branly étudia différentes sortes de limaille et différentes formes de contacts ; il trouva qu'un simple contact imparfait entre des tiges d'acier ou de cuivre oxydées présente les mêmes variations de résistance que les limailles métalliques.

Fig. 44.

Après la découverte de M. Branly, Sir Oliver Lodge, qui travaillait à répéter les expériences de Hertz, eut l'idée d'employer, dans ses expériences, un tube à limaille comme détecteur d'ondes. Le tube qu'il utilisa, et auquel il donna le nom de *cohéreur* (1), contenait de la limaille de fer ou de laiton placée

(1) Sir Lodge a choisi ce mot de *cohéreur* à cause du phénomène par lequel il

dans une atmosphère d'air ou d'hydrogène, ou bien dans le vide. La diminution de résistance de la limaille persistant après l'action des ondes électriques, il fallait imprimer une légère secousse au tube pour le décohérer, c'est-à-dire lui rendre sa résistance normale élevée. Pour cela, Sir Lodge communiquait au support du tube une trépidation régulière en faisant agir sur lui une petite roue en étoile entraînée par un mécanisme d'horlogerie. Il essaya aussi de faire agir sur ce support le marteau d'une petite sonnerie électrique, mais il trouva que les étincelles de rupture de cette sonnerie, produites à proximité du cohéreur, impressionnaient cet appareil.

Sir Lodge employa aussi comme cohéreur un appareil à contact imparfait unique, dans lequel une vis de réglage permettait de donner aux surfaces adjacentes la pression pour laquelle la sensibilité était maxima. Dans une conférence faite en 1894, il répéta devant un nombreux auditoire les principales expériences de Hertz, et le puissant intérêt de ces expériences attira vivement l'attention des Physiciens.

Expériences de M. Popoff.

Le Pr Popoff, de l'École de marine de Cronstadt, songea en 1895 à employer le cohéreur pour déceler et enregistrer les orages éloignés. Pour cela, il relia à un fil aérien vertical, soutenu par un mât en bois, un circuit récepteur comprenant un cohéreur et un enregistreur.

Ce circuit récepteur était établi de la façon suivante (fig. 45) : Le fil aérien *a* était relié en A à l'une des électrodes du cohéreur dont l'autre électrode B était reliée à la terre. Le cohéreur faisait partie d'un autre circuit ADPEB, contenant la pile P et l'électro-aimant E. Lorsque, sous l'action des oscillations de

---

explique le fonctionnement des tubes à limaille. Comme on le verra plus loin, il admet en effet que la limaille s'agglomère, sous l'effet des ondes électriques, et forme de petites chaînes de particules juxtaposées que de microscopiques étincelles soudent ensemble. Un choc rompt ces chaînettes et décohère la limaille que les ondes ont précédemment rendue cohérente.

grande fréquence produites par des décharges atmosphériques lointaines, la résistance du cohéreur tombait à une faible valeur, un courant circulait dans le circuit ADPEB, et l'électro-aimant E attirait sa palette *p*. Celle-ci portait une plume enregistreuse qui marquait un trait sur une feuille de papier portée par un cylindre : d'autre part, la palette *p* établissait en C un contact qui fermait le circuit PG*p*C*ce*FDP contenant l'électro-aimant *e* d'une sonnerie. Le marteau de celle-ci, lorsqu'il vibrait sous l'action de l'électro-aimant *e*, frappait tantôt contre un timbre de sonnerie S, tantôt contre le support du cohéreur pour décohérer celui-ci.

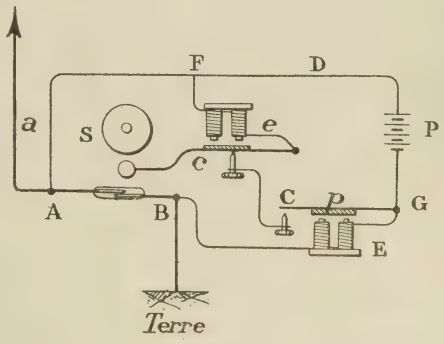


Fig. 45.

Le dispositif de M. Popoff se montra très efficace pour enregistrer les ondes électriques provenant de décharges atmosphériques, ce qui permettait de connaître l'existence d'orages éclatant à une grande distance, et de prévoir les perturbations météorologiques. Dans le compte rendu de ses expériences, le Pr Popoff concluait en indiquant que son dispositif pourrait parfaitement servir à recevoir les signaux d'un transmetteur éloigné, si l'on parvenait à créer avec un tel appareil des perturbations électromagnétiques suffisamment intenses.

Premières expériences de M. Marconi (1896-1897).

Le transmetteur capable de produire des perturbations suffisamment intenses fut inventé par M. Marconi, élève du Pr Righi. L'efficacité de ce transmetteur repose sur l'emploi d'un conducteur isolé, de surface plus ou moins grande, supporté en l'air par un mât, et relié à l'une des boules d'un éclateur dont l'autre boule est connectée à la terre. L'ensemble réalise un

radiateur de Hertz d'une forme particulière, dont une moitié aurait été supprimée et remplacée par la terre. Le conducteur aérien employé par M. Marconi fut d'abord constitué par des plaques, des cylindres ou différentes surfaces métalliques placées à quelques mètres en l'air. Le récepteur, fixé à un conducteur aérien semblable, comprenait un cohéreur à limaille de nickel et d'argent, placé dans un circuit dont le détail sera étudié plus loin. Une clé Morse ordinaire, intercalée dans le circuit primaire de la bobine de Ruhmkorff, permettait d'émettre des ondes pendant un court intervalle de temps, pour figurer un point de l'alphabet Morse, ou pendant un long intervalle de temps, pour figurer un trait de cet alphabet.

Avec ces appareils, M. Marconi constata que, plus les conducteurs aériens étaient élevés, plus la distance franchie était importante. A la fin de l'année 1896 et en 1897, il fit des expériences en Angleterre et put établir des communications entre des points distants de 15 kilomètres, puis de 22 kilomètres. La télégraphie sans fil était créée et pouvait, dès cette époque, être utilisée dans des applications pratiques. Nous allons étudier rapidement les appareils avec lequel l'inventeur était parvenu à ce résultat.

Transmetteur. — Le transmetteur comprenait (fig. 46) une bobine Ruhmkorff à trembleur T dont le primaire P était alimenté par une batterie d'accumulateurs B. Un interrupteur I, ayant la forme d'une clé Morse, permettait de fermer ou d'ouvrir le circuit. Le secondaire S de la bobine était relié à un éclateur E dont les boules étaient connectées d'une part au conducteur aérien *a* nommé *antenne*, et d'autre part à une bonne prise de terre formée d'une plaque métallique enfouie dans le sol. L'antenne était formée d'un fil isolé supporté par un mât ou par un cerf-volant. A l'extrémité supérieure de ce fil était disposée une plaque métallique ou une surface présentant une certaine capacité ; dans le cas où un cerf-volant supportait le fil, il était recou-

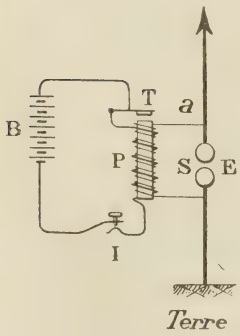


Fig. 46.

vert d'une feuille d'étain [1]. L'éclateur E était d'abord un éclateur de Righi avec étincelle jaillissant dans l'huile ; dans la suite, M. Marconi employa un simple éclateur à boules placé dans l'air.

Récepteur. — Au poste récepteur, une antenne semblable à l'antenne de transmission était mise en vibration par les ondes électromagnétiques provenant du poste transmetteur [2]. Cette antenne aboutissait à l'une des électrodes d'un cohéreur dont l'autre électrode était reliée à la terre, comme dans le dispositif Popoff. En dérivation sur le cohéreur était branché un premier circuit contenant un élément de pile et un relais, dont le fonc-

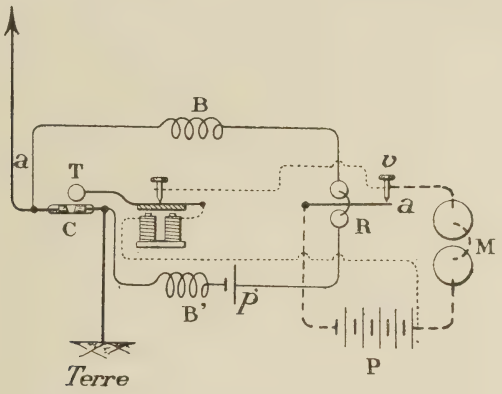


Fig. 47.

tionnement déterminait la fermeture d'un second circuit contenant un enregistreur Morse.

La figure 47 représente ce montage.

Le cohéreur C, établi par M. Marconi, consistait en un petit

---

(1) L'emploi de cette capacité terminale a été abandonné dans la suite.

(2) Ces ondes subissent, dans leur trajet entre le poste transmetteur et le poste récepteur une certaine *absorption* due à la présence d'obstacles matériels ou de corps susceptibles d'entrer plus ou moins en vibration (arbres, tiges métalliques, etc), en empruntant de l'énergie aux ondes. En outre l'action du soleil, qui donne aux couches d'air une certaine conductibilité, provoque une *dispersion* de l'électricité : c'est pourquoi les communications radiotélégraphiques sont toujours meilleures la nuit que le jour et sont souvent impossibles pendant la journée dans les pays tropicaux. On a constaté que les communications radiotélégraphiques sont toujours meilleures sur mer que sur terre : cela tient à ce que l'absorption est moins grande dans le premier cas, grâce à l'absence d'obstacles matériels ; cela provient aussi peut-être de ce que la bonne conductibilité de l'eau salée joue un rôle, mal expliqué jusqu'ici.

tube de verre de 4 à 5 centimètres de longueur et de 0,5 centimètres de diamètre environ. Les deux électrodes étaient formées par des cylindres en argent dont les extrémités étaient taillées en biseau comme le montre la figure 48. La limaille intercalée entre les deux électrodes était composée de 94 parties d'argent et 6 parties de nickel : elle avait été passée au tamis de façon à présenter une grosseur de grains bien régulière. Les fils de platine aboutissant aux électrodes étaient soudés dans le verre du tube fermé aux deux bouts : on faisait le vide dans l'appareil par une petite tubulure *t*, scellée ensuite au chalumeau.

Fig. 48.

Le cohéreur était intercalé entre l'antenne et la terre. En outre, il faisait partie d'un circuit contenant un élément de pile *p* et un relais R extrêmement sensible [1]. Deux bobines de self-induction B et B′ étaient destinées à empêcher, par leur grande résistance inductive, le passage des oscillations dans le circuit dérivé : la résistance ohmique de ces bobines étant faible, elles ne créent pas d'obstacle au passage du courant continu de la pile *p*. Le deuxième circuit, que le relais fermait en *av* lorsque le premier circuit était parcouru par un courant, même très faible, comprenait une forte pile P et un enregistreur Morse ordinaire à électro-aimants. Enfin, un troisième circuit, également fermé par le fonctionnement du relais R, permettait au courant de la pile P d'actionner le tapeur T pour décohérer le tube. Sur le schéma de la figure 47, les trois circuits ont été représentés différemment, pour plus de netteté,

---

[1] Le relais est un appareil qui, agissant sous l'effet d'un courant extrêmement faible, a pour fonction de fermer un second circuit dans lequel peut passer un courant plus intense. Il comprend toujours un système fixe, formé d'électro-aimants ou d'aimants, et un système mobile, formé d'une palette aimantée ou d'un cadre portant un grand nombre de tours de fil. Le courant traverse soit les électro-aimants, soit le cadre mobile : sous l'effet des attractions et des répulsions qui en résultent, le système mobile oscille et établit, dans ce mouvement, un contact qui ferme le second circuit. Dès que le courant cesse de passer dans le premier circuit, le système mobile revient à sa position normale en rompant le second circuit. Sur la figure, on a représenté le relais sous forme d'un électro-aimant et d'une palette oscillante *a*.

le premier étant indiqué en trait plein, le deuxième en trait interrompu, et le troisième en pointillé.

Avec ce dispositif, lorsque des ondes hertziennes atteignent l'antenne *a*, celle-ci se met à vibrer ; les oscillations, agissant sur le cohéreur C, abaissent considérablement la résistance électrique de celui-ci. Un courant produit par la pile *p* circule alors dans le circuit du relais : l'armature mobile oscille et ferme en *av* les deuxième et troisième circuits. L'enregistreur Morse est actionné par le courant de la pile P et inscrit un signal ; le tapeur est également actionné, et décohère le tube C. La résistance du cohéreur revenant à sa valeur primitive, le courant cesse de passer dans le circuit du relais ; l'armature mobile de celui-ci revient à sa position normale, et le courant est rompu dans les deuxième et troisième circuits. Si l'action de l'onde se fait encore sentir sur l'antenne, le cohéreur est à nouveau influencé, et les mêmes phénomènes se reproduisent. Si l'action de l'onde a cessé, tout reste dans l'ordre normal jusqu'au signal suivant. Si le poste transmetteur a émis comme signal un trait de l'alphabet Morse, le train d'ondes a une certaine durée : le cohéreur se cohère et est décohéré par le tapeur plusieurs fois de suite, et l'enregistreur Morse inscrit une série de points très rapprochés qui, par suite de l'inertie de la palette, forment un trait continu. Si le poste transmetteur émet au contraire un point, le train d'ondes dure peu de temps, le cohéreur se cohère et est décohéré peu de fois, et l'enregistreur Morse inscrit un trait très court, c'est-à-dire un point.

Bien entendu, chaque poste ne possède généralement qu'une antenne : celle-ci est reliée tantôt aux appareils transmetteurs, tantôt aux appareils récepteurs suivant que le poste doit émettre ou recevoir des signaux. Pour protéger les appareils récepteurs contre l'action des ondes produites par le poste lui-même lors de la transmission des signaux, on enferme ces appareils dans un coffret métallique, relié à la terre, qui agit comme un écran.

Le poste récepteur est influencé, non seulement par les ondes électromagnétiques provenant du poste transmetteur avec lequel il désire communiquer, mais aussi par les ondes provenant de postes étrangers plus ou moins voisins. Il est aussi

influencé par une catégorie de phénomènes électriques dus aux décharges atmosphériques éloignées ou à l'accumulation de certaines charges d'électricité statique. Les pseudo-signaux qu'enregistrent les appareils-récepteurs sous l'effet de ces phénomèmes sont nommés *signaux parasites* : ils constituent une très grande gêne pour les communications radiotélégraphiques, quand on a recours aux dispositifs simples décrits ci-dessus ; nous verrons que les dispositifs actuellement adoptés permettent d'éviter, ou tout au moins d'atténuer fortement les signaux parasites.

Expériences de transmission à travers la Manche (1899).

En 1898, M. Marconi s'appliqua surtout à perfectionner ses appareils récepteurs pour obtenir une plus grande sensibilité. Dans le premier montage adopté, le cohéreur était directement embroché sur l'antenne au voisinage du sol, comme nous l'avons vu. Or *le cohéreur est un appareil influencé par la différence de potentiel* qui agit entre ses électrodes, et il est facile de comprendre que, la terre étant à un potentiel nul, l'antenne en vibration doit avoir un nœud de tension à sa base reliée à la plaque de terre [1]. Dans ces conditions, la différence de potentiel agissant sur le cohéreur est faible. Au contraire, si l'on peut, par un artifice, placer le cohéreur en un point où existe un ventre de tension, on doit obtenir de bien meilleurs résultats. C'est ce que fit empiriquement M. Marconi en intercalant le cohéreur dans un second circuit accouplé par induction avec l'antenne et mis en résonance avec celle-ci. Le montage adopté par M. Marconi est représenté par la figure 49. Sur celle-ci, A représente le fil allant à l'antenne et *b* le fil allant à la prise de terre ; les bobines *ps* constituent un transformateur d'oscilla-

[1] La formation d'une onde stationnaire dans l'antenne, avec des nœuds et des ventres de courant et de tension, sera étudiée plus loin (page 112). D'après ce qui a été dit au chapitre précédent sur la production d'ondes stationnaires dans les fils, on peut voir dès maintenant que l'antenne, présentant un nœud de tension à sa base, doit présenter en ce même point un ventre de courant.

tions (1) que M. Marconi appelait *jigger* ; C représente un condensateur, BB′ deux bobines de self-induction, souvent appelées bobines de réactance, destinées à arrêter le passage des oscillations ; P était une pile et R un relais sensible. Le cohéreur T était placé dans le circuit oscillant *s*CT accordé de façon à présenter la même fréquence propre d'oscillation que l'antenne.

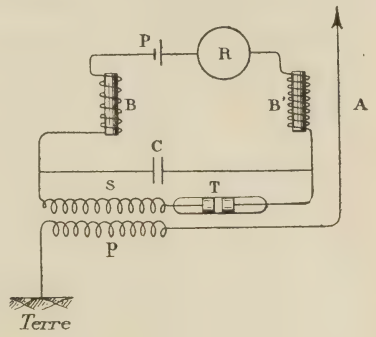


Fig. 49.

En 1899, M. Marconi adoptait le dispositif que représente la figure 50 et dans lequel le cohéreur est bien nettement à un ventre de tension. L'enroulement primaire *p* du transformateur est intercalé entre l'antenne A et la terre : deux enroulements secondaires $s_1 s_2$, reliés entre eux par le condensateur C, aboutissent au cohéreur T. Le circuit oscillant Ts_1s_2C est accordé sur la fréquence propre d'oscillation de l'antenne. En dérivation sur le condensateur C est branché le circuit à courant continu contenant la pile P, le relais R et les deux bobines de self-induction BB′ qui arrêtent les oscillations. Le condensateur C est absolument infranchissable pour le courant continu de la pile P, qui passe par le cohéreur T lorsque la résistance de celui-ci s'abaisse sous l'action des ondes électriques, et est interrompu quand cette résistance reprend sa valeur initiale. Le relais R agit comme primitivement pour

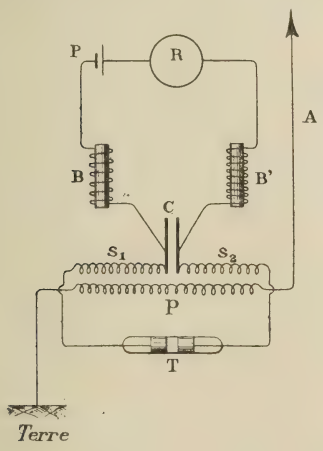


Fig. 50.

(1) Ces appareils ont été étudiés au chapitre VI, page 63.

fermer un circuit contenant une forte pile et un enregistreur Morse.

Au début de l'année 1899, M. Marconi établit une communication de télégraphie sans fil entre Wimereux et Douvres (50 kilomètres). Les antennes étaient de simples fils, sans

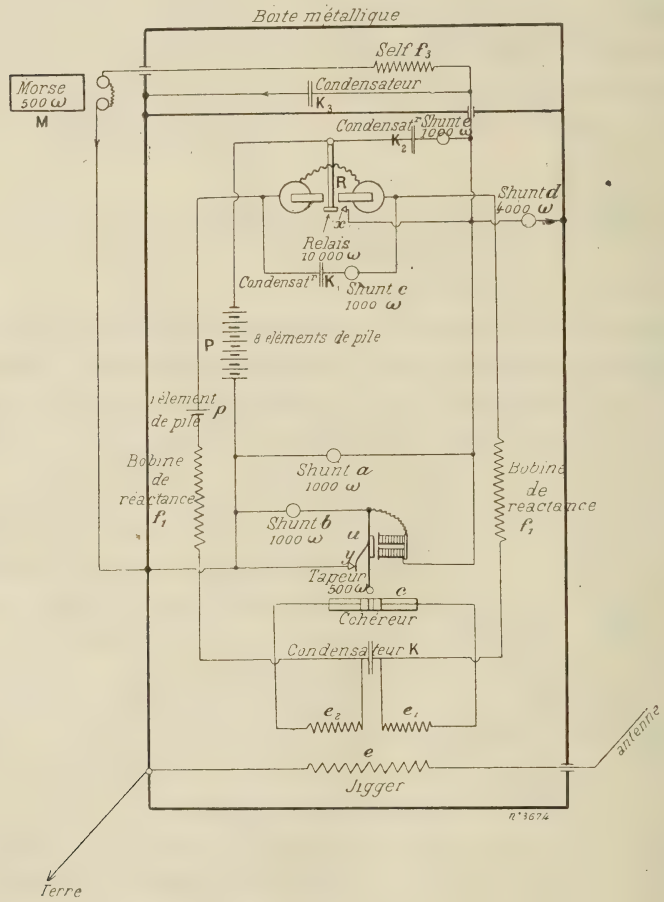


Fig. 51.

plaque terminale, et avaient 46 mètres de hauteur : elles étaient supportées par des mâts en bois et isolées par plusieurs tiges d'ébonite. L'extrémité supérieure du fil était enroulée sur elle-même sous forme d'une bobine plate comprenant quatre ou

cinq tours. Le système transmetteur était le même que dans les premières expériences et consistait en une bobine de Ruhmkorff alimentant un éclateur à boules ordinaire embroché sur l'antenne. Tous les appareils constituant le système récepteur (sauf l'enregistreur Morse) étaient placés dans une boîte métallique destinée à empêcher l'action des ondes lorsque le poste émettait lui-même des signaux pour la transmission. La figure 51 représente d'une façon complète les connexions des circuits. Le montage du cohéreur était le même que sur la figure 50 : le premier circuit à courant continu, fermé par le cohéreur, contenait la pile p, les deux bobines de self-induction $f_1 f_1$ et le relais R. Le deuxième circuit, fermé en x par le relais R, contenait l'enregistreur Morse M, et le troisième circuit, fermé également en x, contenait le tapeur : ces deux circuits étaient alimentés par la pile P. Des condensateurs ou des résistances (shunts) étaient placés en dérivation sur les contacts où il pouvait se produire des étincelles de rupture, de façon à empêcher la formation de celles-ci, qui auraient réagi sur le cohéreur. Sur le schéma, les résistances des différents appareils et des shunts ont été indiquées à côté de chacun d'eux [1].

Les bons résultats obtenus dans ces expériences montrèrent les services que peut rendre, en pratique, la télégraphie sans fil et, depuis lors, les progrès réalisés par différents inventeurs ont permis d'atteindre des portées de quelques milliers de kilomètres.

---

[1] La lettre ω signifie *ohm*, unité de résistance électrique.

CHAPITRE IX

LES DÉTECTEURS D'ONDES

L'invention du cohéreur a rendu possible, comme nous l'avons vu, la réalisation pratique de la Télégraphie par ondes hertziennes. Depuis lors, un certain nombre de perfectionnements ont été apportés à cet appareil pour augmenter sa sensibilité. En outre, plusieurs nouveaux détecteurs d'ondes, basés sur des phénomènes physiques tout différents, ont été successivement inventés et ont donné, au point de vue de la sensibilité, des résultats très supérieurs à ceux obtenus avec les cohéreurs. Nous allons passer rapidement en revue ces divers appareils.

Cohéreurs.

Aux débuts de la télégraphie sans fil, l'esprit inventif des expérimentateurs s'est attaché à réaliser différents types de cohéreurs, et le nombre d'appareils qui ont ainsi vu le jour est considérable : nous décrirons seulement quelques-uns d'entre eux.

Les tubes employés par Sir Lodge et par M. Marconi ont été déjà mentionnés dans le chapitre précédent. M. Marconi, pour augmenter la sensibilité de son cohéreur, ajoutait souvent à la limaille métallique quelques traces de mercure.

Le cohéreur utilisé par M. Popoff avait la constitution suivante (fig. 52) : deux électrodes en platine, formées chacune par une portion de cylindre métallique creux, étaient enfoncées dans un

tube de verre et maintenues par deux bouchons BB′ : entre les deux électrodes était placée de la limaille d'acier. Deux fils f et f' servaient à relier les électrodes au reste du circuit.

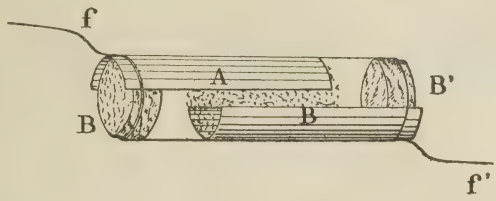


Fig. 52.

Le cohéreur de M. Ducretet est représenté par la figure 53. Un tube T en écaille (1) contient deux électrodes, P′ et P‴ : on peut déplacer l'une d'elles au moyen de la vis V, de façon à régler la pression supportée par la limaille L. Deux calottes mé-

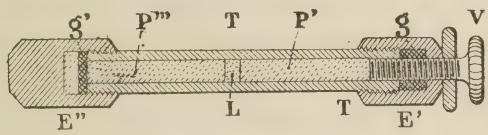


Fig. 53.

talliques E′ et E″ ferment le tube, et sont en contact électrique avec les électrodes en g et g' : il suffit donc de les relier aux fils constituant le circuit récepteur, et cette liaison est effectuée très simplement par des lames à ressorts qui servent de support au cohéreur. Pour son emploi dans les pays très humides, on adjoint au tube de ce cohéreur un petit réservoir contenant de la chaux.

Dans le cohéreur de M. Blondel, le tube en verre porte une tubulure latérale soudée à l'endroit où se trouve la limaille. Cette tubulure, recourbée et fermée à son extrémité inférieure, contient de la limaille que l'on peut faire passer en plus ou moins grande quantité entre les deux électrodes. Le même résultat est obtenu, d'une façon plus simple et plus commode,

(1) Cet isolant, qui a l'avantage de n'être pas fragile, n'est pas altéré par l'humidité et la chaleur, ce qui est précieux pour les pays chauds.

dans le cohéreur de M. le Cap^e Ferrié, que représente la figure 54. L'une des électrodes E porte un évidement longitudinal *r*

Fig. 54.

communiquant avec une gorge circulaire H qui contient la réserve de limaille : l'évidement *r* permet de faire passer de la limaille de H en *l* ou inversement, suivant les besoins. Les deux extrémités du tube sont fermées par des pièces métalliques mastiquées sur le verre : ces pièces sont reliées aux électrodes et portent des vis V servant de bornes de contact. La limaille est en argent ou en or : les électrodes sont en acier poli.

M. Tommasina a employé un cohéreur à grains de charbon placés entre des électrodes de laiton : il s'est servi aussi d'une goutte de mercure intercalée entre ces mêmes électrodes. Un tel appareil présente la propriété d'être auto-décohérant, c'est-à-dire qu'il revient de lui-même à son état primitif quand l'action des ondes cesse (ou tout au moins, il exige, pour revenir à cet état, un ébranlement moins fort que les cohéreurs à limaille métallique).

M. Castelli a réalisé un cohéreur très sensible avec une ou plusieurs gouttes de mercure interposées entre deux ou plusieurs électrodes (fig. 55 et 56). Ces électrodes sont en fer ou

Fig. 55.

Fig. 56.

en charbon et leurs extrémités sont très soigneusement polies : le diamètre des gouttes de mercure doit être compris entre $1^{mm},5$ et 3 millimètres. Tant qu'aucune oxydation ne se produit sur les surfaces de contact et sur le mercure, l'appareil se décohère spontanément : aussi M. Castelli a-t-il employé simplement comme récepteur un téléphone branché, avec un élément de pile, en dérivation sur le cohéreur (fig. 57).

MM. Lodge et Muirhead se sont servis avec succès d'un disque de fer, tournant d'un mouvement continu et effleurant la partie supérieure d'une surface de mercure, recouverte d'une mince couche d'huile.

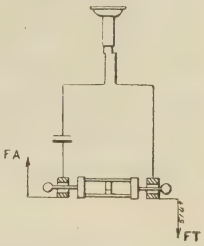


Fig. 57.

Quelques expérimentateurs, au lieu d'utiliser des limailles ou du mercure, ont eu recours à un ou plusieurs contacts imparfaits entre corps solides. On a ainsi employé, par exemple, deux ou plusieurs billes en acier poli placées côte à côte dans un tube incliné, des baguettes métalliques disposées en croix, des fragments de perles métalliques remplaçant la limaille, etc. M. Branly a réalisé aussi un détecteur consistant en un trépied à branches pointues en acier posé sur une surface plane en acier poli.

M. de Forest a inventé un détecteur auquel on a donné le nom d'anticohéreur, parce que sa résistance électrique augmente sous l'action des ondes (au lieu de diminuer, comme dans les cohéreurs ordinaires). Cet appareil comprend deux ou trois électrodes (fig. 58) entre lesquelles est interposée une pâte formée de limaille métallique assez grosse, d'un oxyde (oxyde de plomb tel que de la litharge), de glycérine ou de vaseline, et d'un peu d'eau ou d'alcool. Si l'on introduit un tel appareil dans un circuit local contenant une pile, un très faible courant le traverse, et la limaille s'agglomère, d'après l'inventeur, sous forme de chaînettes relativement conductrices. Quand des oscillations électriques se superposent au courant local, l'eau ou

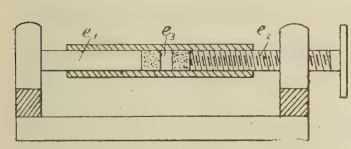


Fig. 58.

Fig. 59.

l'alcool de la pâte se décompose, de très petites bulles de gaz (oxygène et hydrogène) sont libérées, et ces bulles, se plaçant entre chaque grain de limaille métallique et son voisin, ainsi que sur la surface des électrodes, augmentent considérablement

la résistance électrique du système. La figure 59 montre schématiquement, d'après l'inventeur, la formation et la rupture de ces chaînettes de particules conductrices. Aussitôt que l'action des oscillations cesse, les bulles d'hydrogène sont absorbées par l'oxyde de plomb qui se combine avec elles, les bulles d'oxygène produisent une oxydation des surfaces métalliques et disparaissent, et la résistance de l'appareil retombe à sa valeur primitive. Pour utiliser ce détecteur, l'inventeur l'intercalait sur l'antenne et branchait en dérivation un circuit contenant une pile et un récepteur téléphonique (fig. 60).

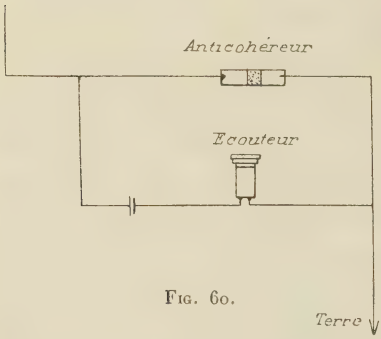


Fig. 60.

Théorie du fonctionnement des cohéreurs. — Plusieurs explications, plus ou moins différentes, ont été données sur le fonctionnement des cohéreurs par MM. Branly, Lodge, Righi, Tommasina, Ferrié, Eccles, Shaw, Guthe et Trowbridge. Chacune de ces théories permet de se rendre compte d'une partie des phénomènes en jeu, mais est impuissante à expliquer la totalité des effets observés.

M. Branly a émis l'opinion que la nature de l'isolant compris entre les particules métalliques est modifiée par l'action de son des qui augmente sa conductibilité : c'est pourquoi il a proposé, pour cette sorte d'appareils, le nom de radioconducteurs. Cette hypothèse est à rejeter, parce qu'aucun effet de ce genre n'a été observé dans les isolants, et, en outre, parce que le fonctionnement du cohéreur n'est pas modifié si l'on fait le vide dans le tube ou si l'on y introduit un gaz quelconque.

Sir Lodge croit que la conductibilité est due à la formation de très petites étincelles qui perçent les couches d'oxydes mauvais conducteurs recouvrant les particules, et qui établissent entre ces particules une continuité métallique, ou même une sorte de soudure. D'après cet auteur, l'attraction électrostatique qui s'exerce entre les particules faciliterait la production des étincelles en provoquant un rapprochement des particules. Cette théorie intéressante peut être vérifiée dans certains cas, mais il

semble que l'on ait affaire alors à des effets secondaires, dus à l'échauffement que produit le passage du courant. Elle se trouve tout à fait en défaut dans certains autres cas, par exemple pour le fonctionnement des cohéreurs à grains de charbon.

M. Eccles suppose que les particules s'orientent sous l'action du champ électrique et s'agglomèrent pour former des chaînettes : cette théorie n'est applicable qu'aux cohéreurs contenant des grains de limaille très légers.

M. Shaw admet, d'après des expériences détaillées, que les particules métalliques subissent, aux points de contact, une orientation déterminée qui assure le minimum de résistance. Cet auteur a trouvé que les phénomènes dépendent de la présence d'une mince couche formée soit par de l'air raréfié, soit par de la vapeur d'eau raréfiée, soit par un oxyde métallique, et que la cohérence ne peut se produire que si cette couche est percée : ses expériences l'ont conduit, en outre, à admettre l'hypothèse d'une fusion superficielle aux points de contact.

Enfin M. Guthe base l'explication des phénomènes sur la théorie des électrons [1], d'après laquelle il existe dans tous les métaux des électrons libres en mouvement. Les ondes électriques ont pour effet de créer un champ électrostatique qui permet aux électrons de quitter le métal, et il apparaît un courant électrique dont ces électrons sont les véhicules. Une fois le courant établi, son intensité va en augmentant, et il se produit une jonction conductrice métallique. Dans les cohéreurs autodécohérents, les parties en contact sont toujours très petites, et il ne peut passer qu'un nombre restreint d'électrons. Il existe bien alors, sous l'effet des ondes électriques, un courant résultant d'un déplacement d'électrons, mais l'intensité de ce courant ne peut pas atteindre une valeur suffisante pour qu'il s'établisse une jonction conductrice permanente.

Comme on le voit, d'après ce résumé rapide des principales théories, l'explication du fonctionnement des cohéreurs n'a pu être encore donnée d'une façon complète : il semble que la

---

[1] Nous avons vu déjà que l'électron est un petit corpuscule portant une charge d'électricité.

théorie de M. Guthe soit celle qui rend le mieux compte de la plupart des faits.

Au point de vue de la sensibilité, les cohéreurs, quel que soit leur type, sont inférieurs à quelques-uns des détecteurs dont il va être question, mais ils présentent l'avantage que la variation de courant à laquelle ils donnent naissance quand ils sont soumis aux effets des ondes électromagnétiques est suffisante pour actionner un relais commandant un récepteur-enregistreur Morse ordinaire. Avec les autres détecteurs, au contraire, on est obligé d'employer un récepteur téléphonique, ce qui offre le grave inconvénient qu'aucune trace ne subsiste de la réception des dépêches.

Bolomètres.

Nous savons que le passage d'un courant électrique dans un conducteur produit un échauffement de celui-ci. Si le courant a une très faible intensité, il faut évidemment que le fil conducteur soit extrêmement fin pour que son échauffement soit perceptible.

Différents détecteurs d'ondes ont été basés sur ce principe dès 1890, et ont été employés, en particulier par M. Rubens, pour l'étude des oscillations électriques. Le premier d'entre eux, qui ait été utilisé pratiquement dans des dispositifs de télégraphie sans fil, est le *bolomètre* de M. Fessenden, que représente la figure 61.

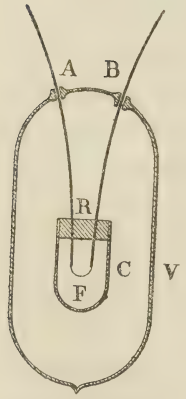


Fig. 61.

Pour obtenir un fil suffisamment fin, l'inventeur a opéré de la façon suivante : un fil très fin de platine, de moins de $0^{mm},1$ de diamètre, est recouvert d'une couche d'argent jusqu'à ce que son diamètre atteigne environ 2 millimètres, puis le fil bimétallique ainsi préparé est étiré jusqu'au plus petit diamètre possible, $0^{mm},05$ par exemple. On le replie alors sous forme d'un U dont on fixe les branches dans une petite rondelle isolante, et l'on plonge la partie inférieure dans de

l'acide nitrique qui attaque l'enveloppe d'argent en laissant intacte l'âme de platine. On peut obtenir ainsi, sur une petite longueur, un fil de platine d'environ 1,5 micron ($0^{mm},0015$) de diamètre : on est même parvenu à fabriquer, par ce procédé, des fils de 1 micron de diamètre.

La boucle de fil F (fig. 61) est placée dans une petite capsule d'argent C que ferme la rondelle isolante R : cette capsule a pour effet de diminuer autant que possible le rayonnement de la chaleur. L'ensemble est disposé dans un récipient V en verre dans lequel on fait le vide. Les deux conducteurs A et B, qui aboutissent à la boucle de fil fin, traversent le récipient dans la paroi duquel ils sont mastiqués.

Le bolomètre est intercalé entre l'antenne réceptrice et la prise de terre. Quand l'antenne est mise en vibration par les ondes électromagnétiques provenant du poste transmetteur, les oscillations électriques traversent le fil fin F et celui-ci s'échauffe, même si l'énergie en jeu est très faible. Pour déceler cet échauffement, on s'appuie sur une propriété commune à tous les métaux, d'après laquelle la résistance électrique croît en valeur quand la température augmente, et l'on intercale le bolomètre dans un circuit local permettant de déterminer cette variation de résistance. On peut aussi brancher en dérivation sur le bolomètre un circuit contenant un récepteur téléphonique et une pile. Dès qu'il se produit une variation de la résistance du fil fin, l'intensité du courant circulant dans le circuit local varie, et le récepteur téléphonique fait entendre un son.

Au lieu d'un fil de platine très fin, M. Fessenden a employé aussi, dans la suite, une petite colonne d'un liquide conducteur contenu dans un tube capillaire de diamètre extrêmement faible : l'échauffement de cette colonne liquide se traduit aussi par une augmentation de résistance électrique. Enfin, il a modifié ce bolomètre à liquide en trempant simplement dans un liquide convenable deux fils de platine très courts et très fins, et en intercalant dans le liquide, entre ces deux fils, un diaphragme en verre percé d'un trou extrêmement petit. Avec cette dernière forme de détecteur, il employait simplement, pour percevoir les signaux, un récepteur téléphonique et une pile formant un circuit branché en dérivation sur l'appareil, qui

était lui-même intercalé entre l'antenne et la prise de terre. Dans ce détecteur à liquide, il est très probable que les phénomènes en jeu ne sont plus de nature calorifique, mais de nature électrolytique, comme dans les appareils étudiés plus loin.

Nous avons vu que le cohéreur est un détecteur d'ondes influencé par la tension, et qu'il ne convient pas de le placer directement au pied de l'antenne, où il existe un ventre de courant (et, par suite, un nœud de tension). Le bolomètre, au contraire, ainsi que les détecteurs dont il va être question, est influencé par le courant, et sa place la plus convenable est au pied de l'antenne.

Détecteurs thermo-électriques.

M. Duddell a établi un appareil qui tient à la fois des détecteurs thermiques dont la description précède et des détecteurs thermo-électriques, que nous allons étudier. L'appareil comprend une bande métallique très mince et très étroite traversée par les oscillations électriques : cette bande s'échauffe sous l'effet du courant oscillant, et la chaleur rayonnante agit sur un petit élément thermo-électrique suspendu librement entre les pôles d'un puissant électro-aimant. Le courant qui prend naissance dans le thermo-élément réagit sur le champ magnétique produit par l'électro-aimant, et le système mobile tourne d'un certain angle : la valeur de cet angle correspond au courant qui traverse le thermo-élément et qui est proportionnel à la chaleur dégagée, c'est-à-dire à l'intensité du courant oscillant.

Parmi les détecteurs thermo-électriques proprement dits, très rarement employés dans la pratique de la télégraphie sans fil, on peut citer celui dont s'est servi Drude au cours de ses remarquables travaux sur l'amortissement des oscillations électriques.

Le thermo-élément est constitué (fig. 62) par un fil de cuivre, ou de fer, et un fil de constantan (alliage de cuivre, de zinc et de manganèse) de $0^{mm},05$ de diamètre et de $0^{cm},5$ à 1 centimètre de longueur. Une croix en ébonite E porte quatre tiges D auxquelles sont fixés des fils de cuivre *d* et *d'*, *s* et *s'* de 1

millimètre de diamètre. Ces fils supportent le thermo-élément de la façon suivante : au fil d est soudé le fil a de constantan, qui, après avoir été replié à angle droit, est soudé au fil s ; au fil d' est soudé le fil de cuivre ou de fer b dont l'autre extrémité est soudée au fil s' après être passée dans l'angle du fil de constantan. Un ressort en hélice, intercalé sur le gros fil s', exerce sur celui-ci une traction qui assure un bon contact entre les fils aa et bb en leur point de croisement. Les fils d et d' sont reliés au circuit oscillant ; les fils ss sont connectés à un appareil de mesure très sensible. Avec ce dispositif, lorsqu'un courant oscillant circule le long des fils $dabd'$, il produit au point de croisement des fils a et b un échauffement qui, par suite de la nature différente des métaux, donne lieu à une force électromotrice thermo-électrique. Celle-ci, agissant dans le circuit de l'appareil de mesure relié en GG' aux fils ss', produit dans ce circuit un certain courant dont l'intensité est indiquée par la déviation de l'aiguille. Cette intensité est proportionnelle à la force électromotrice engendrée dans le thermo-élément : elle correspond donc à la quantité de chaleur développée au point de croisement des deux fils et, par suite, à l'intensité du courant oscillant qui traverse l'appareil.

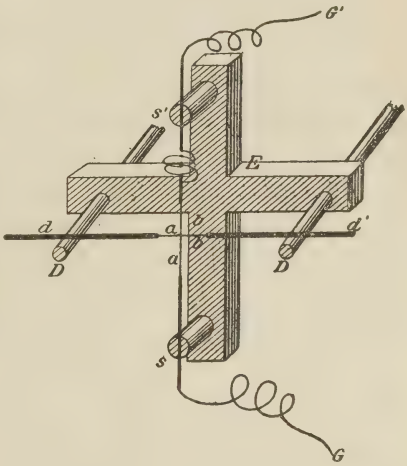


Fig. 62.

On peut augmenter la sensibilité des détecteurs thermo-électriques en les plaçant dans un récipient où l'air est raréfié jusqu'à la pression de $0^{mm},1$ de mercure. M. Schaefer s'est servi d'un appareil de ce genre, contenant un fil de fer et un fil de constantan.

M. Pickard a employé avec succès un détecteur thermo-électrique formé simplement d'une pointe métallique qui s'appuie contre une surface de silicium. La chaleur engendrée au point

de contact par le passage du courant oscillant produit une force électromotrice thermo-électrique : celle-ci engendre un courant dans un circuit dérivé contenant un récepteur téléphonique, qui fait entendre un son chaque fois que des oscillations électriques agissent sur le détecteur.

Détecteurs électrolytiques.

Si l'on plonge deux fils métalliques dans de l'eau additionnée d'une petite quantité d'un acide ou d'un sel qui la rend conductrice (de l'acide sulfurique par exemple), et si l'on relie ces deux fils à un générateur électrique produisant une certaine différence de potentiel, on réalise un appareil électrochimique bien connu nommé *voltamètre*. Si la différence de potentiel produite par le générateur électrique est inférieure à une certaine valeur, nommée *tension de décomposition de l'eau*, aucun courant ne traverse l'appareil ; si au contraire elle est supérieure à cette valeur, un courant traverse le voltamètre, et l'eau est décomposée en ses éléments constitutifs, oxygène et hydrogène. Des bulles d'oxygène apparaissent sur le fil relié au pôle positif de la source de courant (ce fil est nommé électrode positive ou anode) et des bulles d'hydrogène apparaissent sur le fil relié au pôle négatif (électrode négative, ou cathode). Ce phénomène est appelé *électrolyse* de l'eau, et le liquide interposé entre les électrodes est nommée *électrolyte*. Pour exprimer que les électrodes se couvrent d'une couche gazeuse, on dit qu'elles se polarisent, ou qu'il y a *polarisation*.

En 1900, M. le cap^e^ Ferrié signalait, au Congrès international de physique, que l'on peut réaliser un détecteur d'ondes électriques en plongeant, dans de l'eau étendue d'acide sulfurique, une électrode positive formée d'une pointe de platine extrêmement fine et très courte, et une électrode négative formée d'un fil relativement gros. Si l'on relie ces électrodes à une pile dont la différence de potentiel est très légèrement supérieure à la tension de décomposition de l'eau, de façon à faire passer dans le liquide un faible courant et à produire une polarisation des électrodes, l'action d'oscillations électriques sur la

pointe positive provoque une modification importante de la polarisation, modification qui se traduit par un accroissement du courant local traversant l'appareil. Cet accroissement de courant peut, quand l'appareil est bien réglé, atteindre vingt fois la valeur du courant primitif.

On fit peu attention en 1900 à la découverte du capᵉ Ferrié qui, lui-même, n'entrevit pas, à cette époque, tout le parti qu'on en pouvait tirer. En 1903, M. Schloemilch signala qu'il est possible, si l'on se place dans des conditions favorables, de réaliser sur ce principe un détecteur d'ondes extrêmement sensible, et, depuis lors, l'emploi de cet appareil, nommé *détecteur électrolytique,* s'est beaucoup répandu.

On peut employer comme électrode positive une simple pointe en platine fixée à une vis réglable et effleurant à peine le niveau du liquide, ainsi que le montre la figure 63. Le récipient peut être métallique et servir lui-même d'électrode négative, ou bien cette électrode est formée d'une lame ou d'un fil métallique. L'électrode positive peut encore être constituée par un petit tube de verre capillaire immergé dans le liquide et portant à son extrémité une pointe de platine extrêmement fine et très courte : cette pointe est en contact avec un fil plus gros passant dans le tube et relié au circuit extérieur. Pour obtenir une pointe très fine, on opère généralement de la façon suivante : on soude un fil fin de platine dans un tube capillaire en verre, puis on chauffe ce dernier et on l'étire vivement jusqu'à ce qu'il se rompe. Le fil de platine s'étire en même temps que le tube, et après rupture de l'ensemble, une très petite pointe de platine dépasse la surface extrême du verre fondu. L'électrode positive ainsi obtenue est placée dans le liquide avec une électrode négative, formée d'un fil ou d'une lame de platine.

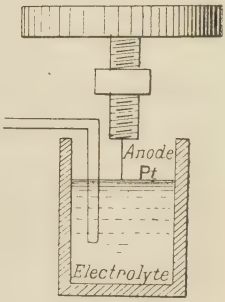


Fig. 63.

Le montage d'un détecteur électrolytique dans un circuit récepteur de Télégraphie sans fil est représenté par la figure 64. L'antenne réceptrice *a* est reliée à la pointe positive *a'* du détec-

teur, dont l'électrode négative c est connectée à la terre e. En dérivation sur le détecteur est branché un circuit contenant un récepteur téléphonique t et une source de courant Pb'. Celle-ci est formée d'une pile b' fermée sur une résistance P dont une plus ou moins grande partie est reliée au circuit dérivé qui contient le téléphone ; ce dispositif, nommé *potentiomètre*, permet de faire agir dans le circuit dérivé une différence de potentiel réglable, exactement déterminée pour l'obtention du maximum de sensibilité.

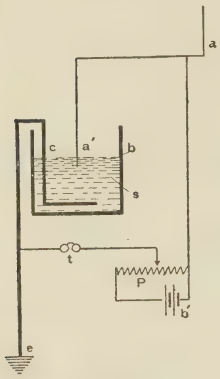


Fig. 64.

Les détecteurs électrolytiques employés par la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie sont établis pour deux sensibilités différentes : les uns possèdent une pointe de platine positive relativement grosse ; ils permettent d'obtenir dans le récepteur téléphonique des sons intenses, mais ils présentent une sensibilité restreinte : les autres possèdent une pointe de platine positive très petite, et donnent des sons moins intenses dans le récepteur téléphonique, mais ils présentent une très grande sensibilité.

Différentes hypothèses ont été formulées pour expliquer le fonctionnement des détecteurs électrolytiques. Leurs propriétés ont été attribuées soit à des phénomènes électrolytiques (M. de Forest), soit à un dégagement de chaleur produit par le passage des ondes (M. Fessenden), soit à des phénomènes de polarisation des électrodes (MM. Reich, Dieckmann, Ives, Rothmund et Lessing, Macku). Il semble que les phénomènes observés soient dus à plusieurs actions simultanées, action thermique, action chimique, action électrostatique à travers la mince pellicule gazeuse qui recouvre l'électrode, et enfin action de dépolarisation d'après laquelle le détecteur fonctionne comme redresseur pour les courants alternatifs [1]. Cette dernière action semble

---

[1] De tels appareils, dans lesquels les électrodes sont dissymétriques, ne peuvent être traversés que dans un sens par le courant électrique, c'est-à-dire qu'ils présentent une résistance faible au courant d'un sens déterminé, et une résistance

être la plus importante. Quand un courant oscillant atteint la pointe polarisée positivement, il détermine une dépolarisation de celle-ci, et il en résulte un accroissement de l'intensité du courant local circulant dans le circuit du récepteur téléphonique. Étant donnée la faible valeur de l'énergie oscillante en jeu dans l'antenne réceptrice, on comprend facilement que la pointe doive être extrêmement petite pour que l'action exercée soit suffisamment importante.

Détecteurs magnétiques.

Plusieurs savants ont signalé, il y a déjà bon nombre d'années, que le courant oscillant provenant de la décharge d'un condensateur exerce une action sur des noyaux de fer préalablement aimantés. En 1896, M. Rutherford utilisa cet effet pour établir un détecteur d'ondes : dans cet appareil, les oscillations électriques traversaient une bobine enveloppant un noyau de fils de fer, et produisaient une diminution de l'aimantation de ce noyau. Cette diminution d'aimantation était mesurée au moyen d'un magnétomètre [1]. Avec cet appareil, M. Rutherford put déceler, à une distance d'un kilomètre environ, les ondes électromagnétiques émises par un oscillateur de Hertz.

En 1902, M. Marconi utilisa le phénomène de variation d'aimantation produit par un courant oscillant, pour établir un détecteur d'ondes très sensible et susceptible d'un bon emploi dans la pratique de la télégraphie sans fil. Cet appareil repose sur le principe suivant :

Quand on soumet le fer à l'action d'un champ magnétique variable qui lui communique une aimantation variable, on constate que l'aimantation produite est toujours en retard sur le

---

élevée au courant de sens opposé. Cette propriété est connue généralement sous le nom de *conductibilité unipolaire*. Si l'on introduit un tel élément dans un circuit à courant alternatif, il se comporte comme une soupape ou un clapet, en laissant passer les portions du courant alternatif qui ont un sens déterminé, et en arrêtant les portions de courant de sens contraire. On peut réaliser ainsi un redresseur de courant alternatif.

[1] Appareil servant à la mesure de l'aimantation.

champ magnétique qui lui donne naissance [1]. Ce phénomène, bien connu des électriciens en ce qu'il crée dans les machines électriques une source de pertes, est appelé *hystérésis magnétique du fer*.

Or l'action des oscillations électriques sur le fer produit un effet équivalant à la suppression de l'hystérésis, d'où résulte une augmentation brusque de l'aimantation du fer soumis à un champ magnétique variable.

Le premier appareil établi sur ce principe par M. Marconi est représenté schématiquement par la figure 65. Un noyau de fer ou d'acier est placé dans une bobine de fil de cuivre dont les extrémités sont reliées d'une part à l'antenne et d'autre part à la terre. Ce noyau de fer est soumis au champ magnétique périodiquement variable produit par un aimant NS qui tourne, d'un mouvement uniforme, autour d'un axe vertical. La bobine primaire, que traversent les oscillations électriques engendrées dans l'antenne réceptrice par l'action des ondes provenant du poste transmetteur, est entourée elle-même d'une bobine secondaire reliée à un récepteur téléphonique. Lorsque, sous l'action des oscillations, il se produit une brusque variation d'aimantation du noyau, une force électromotrice induite prend naissance dans la bobine secondaire et détermine le passage d'un courant dans le circuit du récepteur téléphonique, qui fait alors entendre un son.

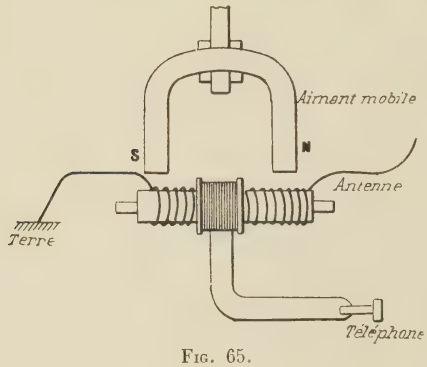


Fig. 65.

Au lieu de faire varier, par la rotation de l'aimant, le champ magnétique qui agit sur un noyau fixe, on peut employer un

[1] C'est-à-dire que, par exemple, quand le champ magnétique variable atteint sa valeur maxima, l'aimantation n'atteint pas encore sa valeur maxima ; quand le champ magnétique variable s'annule, l'aimantation n'est pas encore nulle ; quand le champ magnétique, après avoir changé de sens, atteint sa valeur maxima négative, l'aimantation n'atteint pas encore sa valeur maxima en sens contraire..., etc.

champ magnétique fixe, produit par un aimant immobile, et déplacer le noyau de fer. C'est ce qu'a fait aussi M. Marconi, en employant le dispositif représenté schématiquement par la figure 66, dans lequel le noyau est constitué par un fil ou câble de fer sans fin passant sur deux poulies qui l'entraînent d'une façon continue.

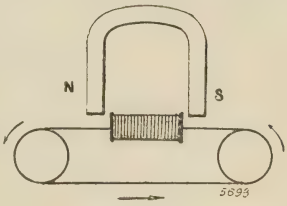


Fig. 66.

M. Wilson a réalisé un détecteur magnétique dans lequel le champ magnétique agissant sur le noyau de fer est produit par un solénoïde parcouru par un courant variable : ce courant est engendré par une pile et un commutateur-interrupteur spécial.

Pour permettre de recevoir les signaux avec un appareil de mesure ou un appareil enregistreur (et non avec un récepteur téléphonique), M. Tissot et M. Walter ont réalisé certaines dispositions particulières du détecteur magnétique, dans lesquelles le courant induit dans la bobine secondaire est redressé au moyen d'un commutateur avant d'agir sur un appareil de mesure.

Détecteurs à vide.

On a proposé depuis longtemps d'employer comme détecteurs d'ondes des tubes vides d'air fonctionnant de différentes façons. M. Righi, M. Tuma et M. Zehnder ont utilisé à cet effet, pour répéter certaines expériences de Hertz, des tubes de Geissler ou des appareils équivalents, qui s'illuminaient sous l'action des ondes électriques. De tels détecteurs présentent une sensibilité faible, et leur emploi a été abandonné.

En 1905 M. Fleming signala un phénomène très particulier de conductibilité unipolaire que présentent certains tubes à vide, et songea à utiliser ce phénomène pour l'établissement d'un détecteur d'ondes. Si un tube vide d'air (fig. 67) contient un cylindre métallique froid à l'intérieur duquel est disposé un filament de charbon incandescent, un courant électrique peut passer de la partie froide (cylindre) vers la partie chaude (fila-

ment), mais non en sens inverse, le tube se comportant comme une soupape. Si donc un courant oscillant traverse la bobine primaire d'un petit transformateur, dont la bobine secondaire fait partie d'un circuit qui contient un appareil de mesure sensible et aboutit au filament et au cylindre du tube (fig. 67), ce circuit sera parcouru par un courant toujours de même sens, les portions de sens inverse du courant oscillant étant arrêtées par le tube : l'appareil de mesure indiquera donc la présence d'un courant électrique. Sur la figure 67, on a représenté une petite batterie dont le courant sert à porter à l'incandescence le filament intérieur.

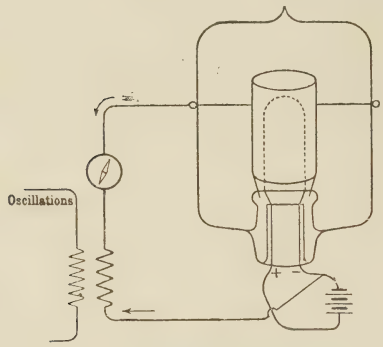


Fig. 67.

En octobre 1906, M. L. de Forest a décrit un détecteur très sensible, semblable extérieurement au redresseur de M. Fleming, mais utilisé d'une façon différente : ce détecteur a été nommé *Audion* par son inventeur.

L'audion est formé d'un tube vide d'air contenant un filament de charbon incandescent, analogue au filament d'une lampe électrique, et deux feuilles de platine relativement froides parallèles à ce filament. Comme l'indique la figure 68, le courant servant à échauffer le filament est fourni par quelques éléments d'accumulateurs A ; en outre, un circuit contenant une batterie B, un appareil de mesure G et un téléphone T est relié d'une part aux feuilles de platine (pôle positif de la batterie B), et d'autre part au filament incandescent. Dans ces conditions, un faible courant traverse le tube en allant des

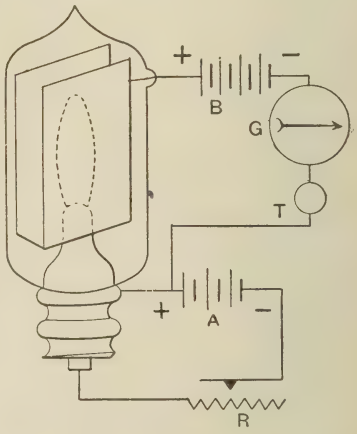


Fig. 68.

feuilles de platine au filament, et l'appareil de mesure G indique une certaine déviation. Lorsque des oscillations électriques agissent sur l'appareil, l'intensité de ce courant local augmente brusquement et le téléphone T fait entendre un son très net. Il suffit donc, pour employer cet appareil comme détecteur dans un poste récepteur de télégraphie sans fil, de relier les feuilles de platine à l'antenne et le filament à la terre.

Il n'est même pas nécessaire de relier les feuilles et le filament à l'antenne et à la terre : on peut employer les montages qu'indiquent les figures 69 et 70. Dans le premier, l'extrémité de

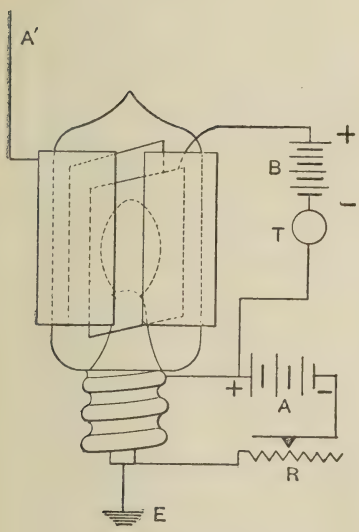


Fig. 69.

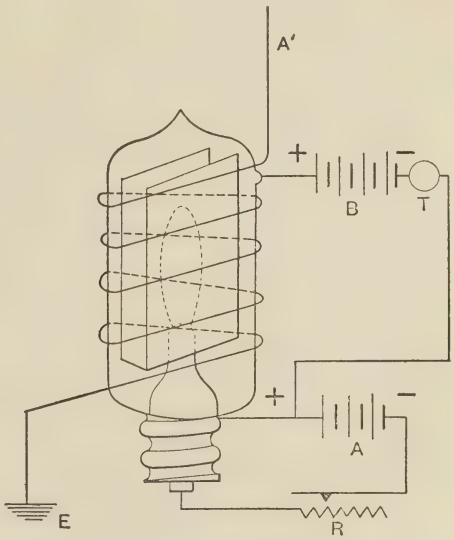


Fig. 70.

l'antenne est connectée à deux plaques métalliques disposées sur la paroi extérieure du tube et formant un condensateur avec le filament : cette disposition a été trouvée très bonne en pratique ; l'audion peut même être placé entre les deux plaques d'un condensateur à air faisant partie du circuit oscillant. Dans le second montage (fig. 70), les oscillations électriques traversent une bobine de fil entourant le tube, ou une bobine plate placée contre le tube et ayant son axe perpendiculaire au filament.

L'inventeur a observé que la distance qui sépare les feuilles

de platine du filament doit avoir une valeur qui dépend de la fréquence des oscillations de l'antenne, si l'on veut obtenir le maximum de sensibilité.

M. de Forest a employé aussi une autre forme d'audion, dans laquelle le tube contient de la vapeur de mercure sous une très faible pression. Comme le montre la figure 71, le détecteur comprend deux électrodes, l'une constituée par un filament incandescent, et l'autre constituée par du mercure dont la vapeur remplit le tube. Un champ magnétique, produit par un électro-aimant, agit dans la région comprise entre la surface du mercure et le filament ; par suite d'un phénomène particulier, la fréquence des oscillations pour laquelle le détecteur présente le maximum de sensibilité varie avec l'intensité du champ magnétique : on règle donc sa valeur pour obtenir le maximum d'effet.

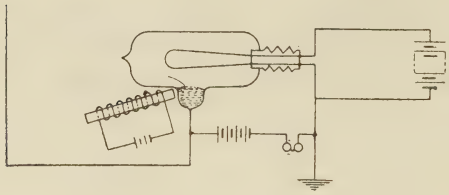


Fig. 71.

La façon dont l'audion doit être placé dans le circuit oscillant, ainsi que certaines particularités du fonctionnement de cet appareil, montrent que c'est plutôt un détecteur influencé par la tension qu'un détecteur influencé par le courant.

En ce qui concerne la température du filament incandescent, elle doit être à peu près égale à celle du filament d'une lampe électrique à incandescence. La durée d'utilisation d'un audion est donc à peu près la même que celle d'une lampe à incandescence munie d'un filament analogue.

On n'a pas encore donné d'explication du fonctionnement de l'audion. Il semble que l'action de cet appareil, comme celle du détecteur électrolytique, soit due en grande partie à sa conductibilité unipolaire. De même, un tube à vide, muni d'une électrode négative recouverte d'oxydes métalliques incandescents, présente une conductibilité électrique unipolaire et peut servir de détecteur d'ondes dans des conditions semblables à celles de l'audion.

CHAPITRE X

LA SYNTONISATION

Nous avons vu précédemment que, lorqu'on fait agir un circuit primaire sur un circuit secondaire, on obtient le maximum d'effet quand les deux circuits sont en résonance, c'est-à-dire quand ils ont même fréquence propre d'oscillation. Il en est de même pour un transmetteur et un récepteur de télégraphie sans fil. La *syntonisation* consiste dans l'accord des différents circuits oscillants qui constituent le système transmetteur et le système récepteur, et dans l'accord de ces deux systèmes entre eux. Souvent aussi, on appelle dispositifs de syntonisation des dispositifs permettant au poste récepteur de n'être pas influencé par les signaux qui ne lui sont pas destinés.

Avant d'étudier la syntonisation, il faut d'abord considérer les phénomènes en jeu dans les antennes transmettrice et réceptrice, et apprendre à déterminer la fréquence des oscillations en mesurant la longueur d'onde des perturbations électromagnétiques engendrées.

Phénomènes en jeu dans les antennes.

Antenne simple. — Considérons l'antenne simple transmettrice de M. Marconi sans capacité terminale, et examinons ce qui s'y passe (fig. 72). Le conducteur aérien A, l'étincelle qui jaillit entre les boules de l'éclateur E, et le fil de jonction à la terre T constituent un conducteur ininterrompu dans lequel se

propagent des ondes électromagnétiques [1]. D'après ce que nous avons vu au chapitre VI, la propagation d'une perturbation électromagnétique dans un conducteur est caractérisée par la formation d'ondes stationnaires présentant des nœuds d'oscillation et des ventres d'oscillation qui alternent entre eux : un nœud et un ventre sont séparés par une distance égale au quart de la longueur d'onde de la perturbation qui se propage dans le fil. Nous avons vu encore que l'onde de courant et l'onde de potentiel (ou onde de tension) ne sont pas en phase et que, aux points où il existe des nœuds d'oscillation de l'onde de courant (appelés brièvement nœuds de courant), il existe des ventres d'oscillation de l'onde de tension (appelés brièvement ventres de tension) : inversement, aux points où il existe des ventres de courant, il existe des nœuds de tension.

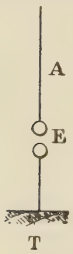


Fig. 72.

Dans une antenne simple, telle que celle que représente la figure 72, le point où le fil inférieur pénètre dans le sol est évidemment un nœud de tension, si la prise de terre est bonne, puisque le potentiel de la terre est nul par définition (ainsi que nous l'avons vu au chapitre III). En ce point il existe donc un ventre de courant. On voit que, *au pied d'une antenne reliée à la terre, il existe un nœud de tension et un ventre de courant.*

A l'extrémité supérieure de l'antenne, où, par hypothèse, il n'existe pas de capacité terminale supplémentaire — comme c'est le cas dans les antennes employées généralement —, il y a un nœud de courant puisque l'intensité est forcément nulle, le conducteur étant interrompu en ce point et soigneusement isolé. Il y a donc un ventre de tension. On voit que, *à l'extrémité supérieure d'une antenne reliée à la terre, il existe un ventre de tension et un nœud de courant.*

Puisque un ventre et un nœud successifs sont séparés par une distance égale au quart de la longueur d'onde des ondes électromagnétiques qui se propagent, on voit que la distance

---

[1] Comme on se le rappelle, l'éclateur *t* est relié au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff.

du sommet de l'antenne au pied de l'antenne, ou, autrement dit, *la longueur totale de l'antenne reliée à la terre est égale au quart de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique engendrée.* On exprime souvent ce fait en disant que *l'antenne vibre en quart d'onde.*

Pratiquement, on peut se rendre compte d'une façon simple que la tension va en croissant depuis le pied de l'antenne jusqu'à son extrémité libre, par les étincelles que l'on peut en tirer et dont la longueur augmente depuis la base jusqu'à l'extrémité. La loi théorique d'après laquelle l'antenne vibre en quart d'onde est suffisamment vérifiée en pratique : cependant, la longueur d'onde des ondes engendrées est toujours un peu supérieure au quadruple de la longueur de l'antenne, à cause de certaines influences dont on ne peut tenir compte que dans une théorie rigoureuse et compliquée : la différence entre le résultat rigoureux et le résultat approché est d'ailleurs très faible.

Au poste récepteur, les phénomènes sont les mêmes. L'antenne réceptrice, sur laquelle agissent les ondes électromagnétiques émises par le transmetteur, entre en vibration et présente un ventre de tension avec un nœud de courant à son extrémité supérieure, et un nœud de tension avec un ventre de courant à sa base. L'antenne vibre avec sa fréquence propre, et les oscillations électriques qui prennent naissance correspondent à une longueur d'onde égale à quatre fois la longueur de l'antenne. On obtient le maximum d'effet entre l'antenne transmettrice et l'antenne réceptrice quand il y a résonance, c'est-à-dire quand les deux antennes ont la même fréquence d'oscillation. Avec les antennes simples telles que celle de la figure 72 (au poste récepteur, l'éclateur E est remplacé par le cohéreur), il faut, pour que les antennes aient même fréquence propre d'oscillation, que leurs longueurs soient égales. Si les longueurs des deux portions aériennes ne peuvent pas être égales, par suite des hauteurs différentes des mâts ou des supports dont on dispose [1], on est conduit à enrouler, sous forme

[1] Au lieu de mâts, on peut employer des ballons, des cerfs-volants, des cheminées d'usine, etc.

d'une bobine, une certaine longueur du conducteur qui constitue l'une des antennes : cette bobine peut porter un curseur mobile permettant de mettre en circuit un plus ou moins grand nombre de tours, et d'accorder ainsi convenablement l'antenne : on la désigne généralement sous le nom de *bobine d'accord*.

Quelquefois, il est impossible de relier l'antenne à une prise de terre : c'est le cas, par exemple, lorsqu'étant en ballon, on veut transmettre ou recevoir des signaux. On peut alors doubler la longueur d'antenne, c'est-à-dire employer une antenne de longueur égale à une demi-longueur d'onde. Il se forme aux deux extrémités des nœuds de courant et des ventres de tension et, au milieu de l'antenne, un ventre de courant avec un nœud de tension.

Antenne accouplée directement avec un circuit oscillant fermé. — Comme nous le verrons dans la suite, on a été conduit, pour augmenter la quantité d'énergie en jeu et les effets de résonance, à accoupler l'antenne transmettrice (qui représente un circuit oscillant ouvert) avec un circuit oscillant fermé contenant une capacité convenable. Cet accouplement peut être réalisé directement (fig. 73) ou par induction (fig. 74),

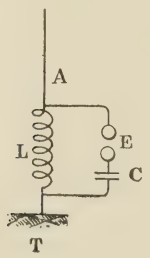


Fig. 73.

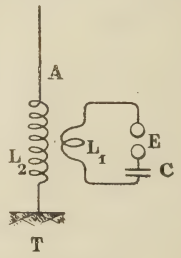


Fig. 74.

comme pour les circuits oscillants fermés que nous avons étudiés au chapitre v. De même, l'antenne réceptrice peut être accouplée directement ou par induction à un circuit oscillant fermé qui contient le détecteur d'ondes. Dans l'un et l'autre cas, le circuit oscillant fermé et l'antenne accouplée avec lui doivent être accordés ensemble d'une façon très précise,

pour que les conditions de résonance soient remplies et que le maximum d'effet soit obtenu.

Dans le cas de l'accouplement direct (fig. 73), le circuit fermé comprend une bobine de self-induction L, et un condensateur C. L'antenne comprend la bobine L ou une portion plus ou moins importante suivant que l'accouplement doit être plus ou moins rigide, le fil de jonction à la terre, et le conducteur aérien. Il faut régler la capacité du condensateur C pour que la fréquence propre d'oscillation du circuit fermé soit égale à celle de l'antenne : on peut aussi effectuer ce réglage sur la bobine L elle-même, en n'intercalant dans le circuit fermé qu'un certain nombre de tours de cette bobine, et non la totalité des tours. Dans ce dernier cas, les tours intercalés dans le circuit fermé agissant inductivement sur les autres tours de la bobine, l'accouplement entre le circuit et l'antenne se trouve doublement réalisé ; d'une part directement par les tours communs ; d'autre part inductivement, par induction des tours communs sur les tours qui font partie de l'antenne seule.

Antenne accouplée par induction avec un circuit oscillant fermé. — Dans le cas de l'accouplement par induction (fig. 74), on peut, comme nous l'avons vu pour les circuits oscillants fermés, réaliser un accouplement rigide ou un accouplement lâche, suivant que les tours de la bobine secondaire L_2 embrassent la majeure partie ou une faible partie du nombre total des lignes de force magnétiques engendrées par la bobine primaire L_1. La valeur de l'accouplement joue un rôle très important au point de vue de la résonance. Nous avons vu, au chapitre VI que, d'un façon générale, quand deux circuits oscillants ont été exactement accordés sur la même fréquence avant leur accouplement, il se produit, dans le système formé par les deux circuits accouplés, deux groupes d'oscillations de fréquences différentes. Quand l'accouplement est très lâche, l'antenne oscille à peu près librement, sans réagir sur le circuit fermé qui l'excite inductivement : les fréquences des deux groupes d'oscillations sont très voisines l'une de l'autre et se confondent presque, de sorte que l'on peut obtenir une réso-

nance aiguë ; malheureusement, l'énergie transmise à l'antenne par le circuit fermé est faible. Pour que le circuit oscillant cède beaucoup d'énergie à l'antenne, il faut que l'accouplement soit rigide. Dans ce cas, il se produit une forte réaction du secondaire (antenne) sur le primaire (circuit fermé) : les fréquences des deux groupes d'oscillations qui prennent naissance dans le système sont très différentes, et l'action exercée sur l'antenne réceptrice est beaucoup moins nette (1). Avec l'accouplement rigide, les amplitudes initiales des oscillations de l'antenne sont grandes, mais l'amortissement est rapide ; avec l'accouplement lâche, les amplitudes initiales des oscillations sont sensiblement plus faibles, mais l'amortissement est beaucoup moins rapide (2). La quantité d'énergie que peut absorber une

---

(1) On est conduit à accorder cette antenne, ainsi que le système récepteur, sur une seule des deux fréquences d'oscillation du système transmetteur.

(2) M. le Dr Franck a établi, pour illustrer les phénomènes en jeu dans le circuit oscillant et dans l'antenne, un modèle mécanique tout à fait intéressant. Comme nous l'avons vu dans l'étude des circuits oscillants, la capacité joue, au point de vue électrique, le même rôle que l'élasticité, et la self-induction joue le même rôle que l'inertie. Dans le modèle de M. Franck, le circuit oscillant fermé est représenté par une lame de ressort verticale, pincée dans une mâchoire à son extrémité inférieure et portant, vers son extrémité supérieure, une masselotte de plomb. L'antenne est représentée par une planche mince élastique, trois ou quatre fois plus haute que la lame vibrante, placée verticalement à quelque distance de celle-ci et fixée à sa base sur le support commun. Un ressort, plus ou moins rigide ou lâche, fixé à quelque distance de la base, relie la lame vibrante à la planche ; il réalise entre ces deux systèmes oscillants un accouplement rigide ou lâche. En déplaçant convenablement la masselotte portée par la lame vibrante et fixée par une vis, on peut régler la fréquence propre d'oscillation de celle-ci et lui donner une valeur exactement égale à la fréquence d'oscillation de la planche.

Les deux systèmes oscillants étant ainsi accordés, on les relie l'un à l'autre par un mince ruban de caoutchouc (accouplement lâche), et l'on met en vibration la lame élastique en écartant de sa position la masselotte de plomb : on voit alors la planche se mettre à vibrer peu à peu et effectuer des oscillations de même période et d'amplitude peu considérable. Après avoir atteint un maximum, l'amplitude des oscillations des deux systèmes va en décroissant lentement. C'est le cas de la résonance simple, obtenue avec un accouplement lâche.

On remplace ensuite le ruban de caoutchouc par un ressort à boudin moyennement rigide, et l'on voit, en faisant vibrer la lame élastique, que la planche entre aussitôt en vibration. Les deux groupes d'oscillations qui se produisent, et qui, pour cet accouplement moyennement rigide, ne diffèrent pas considérablement l'un de l'autre, produisent des battements visibles ; l'amplitude des vibrations de chacun des deux systèmes oscillants devient nulle au bout d'un certain nombre d'oscillations, tandis que l'amplitude des vibrations de l'autre système est maxima, puis les rôles

antenne dépend beaucoup de la valeur de l'amortissement et du coefficient d'accouplement. Pour une antenne présentant un fort amortissement, il est généralement meilleur d'employer un accouplement assez rigide ; pour une antenne présentant un faible amortissement, on a avantage à employer un accouplement très lâche.

Une antenne réceptrice, accouplée inductivement avec un circuit oscillant fermé qui contient le détecteur, répond aux mêmes conditions qu'une antenne transmettrice : l'accouplement peut être lâche ou rigide. On obtient les meilleurs résultats au poste récepteur, au point de vue de l'intensité des signaux reçus, quand l'accouplement employé est le même qu'au poste transmetteur. Mais l'accouplement lâche est le plus fréquemment utilisé, car c'est lui qui permet le mieux d'éviter les perturbations dues aux signaux étrangers ou parasites.

Résonance de l'antenne réceptrice. — Faisons fonctionner d'une façon continue une antenne transmettrice, de façon à émettre une série d'ondes électromagnétiques, et étudions ce qui se passe dans une antenne réceptrice dont nous faisons varier graduellement la fréquence propre d'oscillation depuis une valeur inférieure à la fréquence de l'antenne transmettrice jusqu'à une valeur supérieure à cette fréquence. Pour pouvoir mesurer le courant oscillant engendré dans l'antenne réceptrice intercalons à la base de celle-ci un appareil thermique [1].

Supposons d'abord que l'antenne transmettrice soit une antenne simple (avec éclateur directement intercalé, fig. 72). Nous constatons, en modifiant graduellement la fréquence pro-

---

s'inversent : le phénomène s'amortit et s'éteint sensiblement plus vite que dans le cas précédent.

Enfin si l'on remplace le ressort par une liaison rigide (accouplement rigide), la planche présente, dès le début, des oscillations d'amplitude beaucoup plus grande, mais le phénomène s'amortit très rapidement. Le mouvement irrégulier de la planche et les battements qui se produisent montrent nettement l'existence de deux groupes d'oscillations de fréquences différentes.

[1] Par exemple prenons un bolomètre (chapitre IX, page 98) et plaçons son fil chaud dans le réservoir d'un thermomètre à air : l'échauffement du fil est proportionnel au carré de l'intensité du courant oscillant qui le traverse, et cet échauffement détermine une dilatation de l'air du réservoir thermométrique ; en observant les indications du thermomètre, on peut donc déterminer les valeurs relatives du courant oscillant.

pre de l'antenne réceptrice [1], que l'intensité du courant oscillant va en croissant lentement d'abord, puis très rapidement, pour atteindre un maximum aigu après lequel sa valeur diminue rapidement d'abord, puis plus lentement. La courbe obtenue est analogue à celle que représente la figure 29, relative au cas de circuits oscillants fermés. Le maximum d'intensité du courant oscillant correspond à la fréquence pour laquelle se produit la résonance.

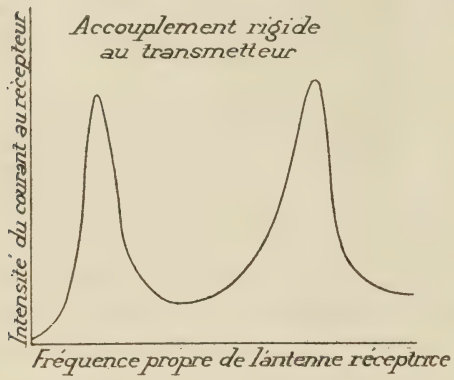


Fig. 75.

Supposons maintenant que l'antenne transmettrice soit excitée par induction (fig. 74) par un circuit fermé. D'une façon générale, elle émet deux groupes d'oscillations de fréquences distinctes. Si l'accouplement entre l'antenne et le circuit excitateur est rigide, ces fréquences diffèrent sensiblement. En modifiant graduellement la fréquence propre d'oscillation de l'antenne réceptrice, on constatera donc, comme l'indique la figure 75, la production d'un premier maximum du courant oscillant (correspondant à la résonance de l'antenne réceptrice sur la plus basse des deux fréquences du système transmetteur), puis

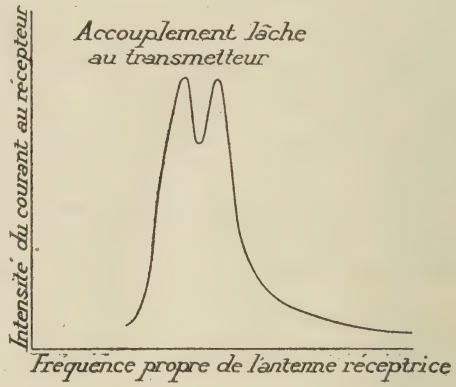


Fig. 76.

[1] Cette variation graduelle de la fréquence peut être obtenue soit par modification de la longueur de l'antenne, soit par modification du nombre de spires d'une bobine intercalée à sa base.

d'un second maximum du courant oscillant (correspondant à la résonance de l'antenne réceptrice sur la plus élevée des deux fréquences du système transmetteur). Il y aura lieu d'accorder l'antenne réceptrice sur l'une ou l'autre des deux fréquences.

Si l'accouplement entre l'antenne transmettrice et son circuit excitateur est rendu de plus en plus lâche, les deux fréquences des oscillations qui prennent naissance dans le système se rapprochent l'une de l'autre ; par suite, les deux maxima obtenus dans la courbe de résonance de la figure 75 se rapprochent l'un de l'autre. Pour un accouplement suffisamment lâche, on obtient une courbe de résonance telle que celle de la figure 76; à la limite, pour un accouplement extrêmement lâche, on obtiendrait un seul maximum aigu tel que celui de la courbe de la figure 29 (page 60).

Mesure des longueurs d'onde.

D'après ce qui précède, on voit toute l'importance que présente la connaissance exacte des fréquences et des longueurs d'onde. Or, si l'on peut facilement évaluer la longueur d'onde dans le cas d'une antenne simple, puisqu'elle est à peu près égale à quatre fois la longueur totale de l'antenne, il n'en est plus de même dans le cas d'antennes excitées par induction, parce que la bobine L_2 (fig. 74) représente une longueur inconnue d'antenne rectiligne équivalente. En fait, on peut admettre, pour des évaluations grossières, que le fil ainsi enroulé sous forme d'une bobine est à peu près équivalent à un fil rectiligne de longueur double, mais c'est là une loi tout à fait approximative, et il est nécessaire, pour les réglages exacts, de posséder une méthode ou un appareil permettant la détermination rigoureuse des longueurs d'onde. Nous allons passer rapidement en revue les méthodes ou appareils employés à cet effet.

Méthode du Cap^e^ Ferrié. — Pour mesurer la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique produite par une antenne simple, M. le Cap^e^ Ferrié relie à la base de celle-ci un fil horizontal dont il modifie progressivement la longueur. Ce fil prend

part au mouvement vibratoire de l'antenne et est le siège d'oscillations électriques ; on y intercale, au voisinage de la jonction avec l'antenne, un appareil de mesure (ampèremètre) thermique permettant d'évaluer l'intensité du courant oscillant. Quand on augmente progressivement la longueur du fil, dont l'extrémité est soigneusement isolée, on voit les indications de l'ampèremètre thermique augmenter jusqu'à une valeur maxima, au delà de laquelle elles vont en décroissant. Cette valeur maxima correspond à la résonance, et la longueur du fil horizontal est alors égale au quart de la longueur d'onde cherchée. Cette méthode est très commode, mais les résultats qu'elle donne ne sont pas rigoureux, car la présence du fil horizontal relié à l'antenne amène une modification de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique engendrée. Pour les besoins de la pratique, elle convient parfaitement.

Bobine de M. Seibt. — Nous avons vu, en étudiant la propagation des ondes dans les fils conducteurs, qu'il se produit des nœuds et des ventres d'oscillation, un nœud et un ventre étant séparés par une distance égale au quart de la longueur d'onde. Cette longueur d'onde dépend de la fréquence des oscillations électriques et de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique, ces trois grandeurs étant liées entre elles (page 10) par la relation :

$$\lambda = \frac{v}{f}.$$

Or, la vitesse v de propagation des ondes électromagnétiques dans un conducteur dépend de la capacité et de la self-induction de ce conducteur : si l'on appelle c et l cette capacité et cette self-induction par unité de longueur, la vitesse v est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de ces deux grandeurs. Il en résulte que, si l'on réalise artificiellement un conducteur présentant une forte capacité et une forte self-induction par unité de longueur, la vitesse de propagation des ondes dans ce conducteur sera considérablement diminuée, et la longueur d'onde correspondant à une fréquence donnée sera beaucoup plus petite que dans un fil rectiligne ordinaire. On pourra donc, avec un tel conducteur, déterminer la position des nœuds

et des ventres d'oscillation sans être conduit à des dimensions d'appareils exagérées : la distance entre un nœud et un ventre étant égale au quart de la longueur d'onde, on pourra en déduire cette grandeur, et, grâce à un étalonnage préalable, déterminer la valeur de la fréquence.

Cette méthode a été employée par M. Seibt. Un fil très fin, légèrement isolé, est enroulé, sous forme d'une hélice à tours juxtaposés, sur une tige de bois ou de verre : la bobine ainsi formée constitue le conducteur [1] de forte self-induction et de forte capacité par unité de longueur. Cette bobine R est reliée à sa base à un circuit oscillant comprenant un condensateur C, un éclateur E et une bobine de self-induction réglable S. Le condensateur est relié au secondaire d'une bobine de self-induction ; l'une de ses armatures est connectée à la terre (fig. 77). En modifiant la valeur de la self-induction S, on peut produire dans le circuit oscillant des vibrations électriques de fréquence telle que la perturbation électromagnétique qui se propage dans la bobine R ait une longueur d'onde égale à quatre fois la longueur de la bobine. Il y a alors un ventre de tension au sommet de la bobine, où apparaissent de brillantes aigrettes lumineuses. Inversement, si la fréquence des oscillations engendrées par le circuit est invariable, on peut, en modifiant la longueur active de la bobine, trouver une valeur pour laquelle un ventre de tension se manifeste à son sommet : la longueur de la bobine est alors égale au quart de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique qui s'y propage.

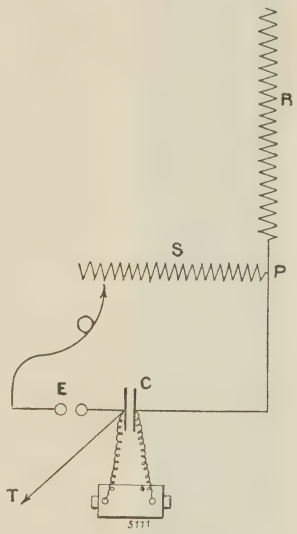


Fig. 77.

[1] Il faut bien remarquer que ce n'est pas la longueur du fil constituant la bobine qui intervient, mais la longueur de la bobine elle-même, qui, pour les ondes électromagnétiques, se comporte comme un conducteur cylindrique creux de self-induction et de capacité déterminées.

On peut placer parallèlement à la bobine et à quelques centimètres de sa surface extérieure un fil rectiligne relié à la terre : au voisinage du ventre de tension, il jaillit entre la bobine et le fil une série d'étincelles d'autant plus lumineuses et plus serrées qu'elles sont plus proches du ventre de tension. On peut encore coller à intervalles réguliers sur la bobine, au moyen d'un peu de cire, des petits fils de cuivre nu qui servent de points de départ à des aigrettes lumineuses, lorsqu'ils sont à proximité d'un ventre de tension. La figure 78 montre la photographie des aigrettes ainsi obtenues, pour une longueur de bobine égale au quart de la longueur d'onde. Cettte bobine avait 2 mètres de longueur environ et était formée d'un fil de cuivre de $0^{mm},3$ isolé à la soie et enroulé sur une tige de bois de 37 millimètres de diamètre. De petits fils de cuivre nu étaient collés tous les deux centimètres sur l'isolant, pour indiquer la valeur de la tension électrique.

Fig. 78.

Ondamètre de M. Slaby. — L'appareil de M. Slaby repose sur le principe précédent. Un tube de verre porte un nombre considérable de tours de fil très fin juxtaposés : pour exciter cette bobine, on place son extrémité libre à proximité de l'antenne, puis, avec une tige métallique tenue à la main, on modifie sa longueur active. La production d'un ventre de tension au sommet de la bobine est mise en évidence au moyen d'un écran fluorescent au platino-cyanure de baryum, qui paraît lumineux quand il est soumis à une forte excitation électrique.

Ondamètre de M. Fleming. — Le même principe a été encore utilisé par M. Fleming pour la construction d'un ondamètre. Un noyau d'ébonite de 2 mètres de longueur et 4 centimètres de diamètre porte 5 000 tours de fil nu très fin juxtaposés et légèrement isolés les uns des autres. L'une des extrémités de cette bobine est reliée soit au circuit oscillant SCT_1 qui excite

l'antenne, soit à l'antenne elle-même (fig. 79). Un contact glissant S_L, qui frotte sur les tours de fil, est relié à la terre par un conducteur et permet de mettre en circuit une longueur plus ou moins grande de la bobine. Les nœuds et les ventres de tension qui se produisent le long de la bobine sont mis en évi-

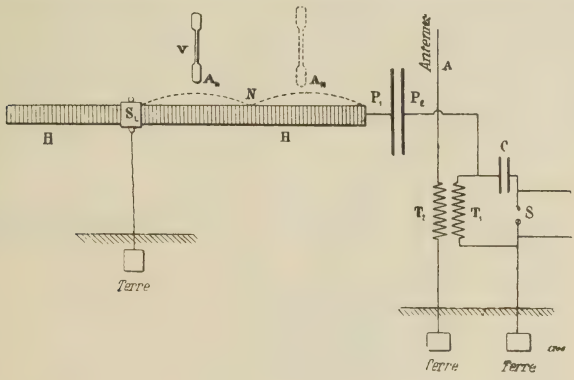


Fig. 79.

dence au moyen d'un tube à vide V, qui s'illumine quand il est au voisinage d'un ventre de tension et reste obscur au voisinage d'un nœud de tension. Il est nécessaire de protéger l'hélice de fil de l'action indirecte des oscillations de l'antenne ou des étincelles de l'éclateur : ce résultat est obtenu par l'interposition d'un écran métallique relié à la terre.

Ondamètre de M. Dönitz. — Au lieu de modifier la longueur active d'une bobine excitée par l'antenne, on peut accoupler avec celle-ci un circuit résonant fermé, contenant une bobine de self-induction réglable ou un condensateur de capacité réglable : si les valeurs de la self-induction et de la capacité sont exactement connues, grâce à un étalonnage préalable, il est facile de calculer la fréquence propre du circuit oscillant fermé, c'est-à-dire la fréquence des oscillations de l'antenne, lorsque le circuit oscillant est en résonance avec celle-ci. Cette méthode a été employée par Drude et par M. Dönitz : ce dernier a établi ainsi un ondamètre pratique et précis, fréquemment employé en Allemagne.

L'appareil de M. Dönitz (fig. 80) comprend un circuit oscil-

lant fermé contenant une bobine de self-induction et un condensateur de capacité progressivement variable. Le nombre de tours de la bobine de self-induction peut-être modifié, par adjonction ou suppression d'une ou plusieurs couronnes de fil. Le condensateur est formé d'une série de plaques métalliques fixes f, en forme de secteurs de cercle, entre lesquelles peut venir se placer une série de plaques mobiles b, également en forme de secteurs de cercle, portées par un axe vertical a. Les bornes du condensateur sont en p_1 et p_2. L'ensemble est plongé dans l'huile. Suivant qu'on tourne plus ou moins un bouton

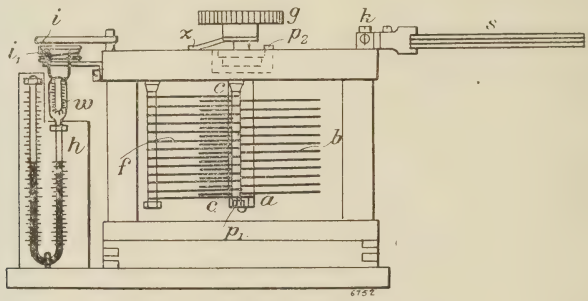


Fig. 80.

moleté g fixé à l'axe vertical, les plaques mobiles pénètrent plus ou moins entre les plaques fixes, et la capacité a une valeur plus ou moins élevée : cette valeur est indiquée par un index z, fixé au bouton, qui se déplace au-dessus d'une graduation tracée sur le couvercle de l'appareil. Le circuit oscillant comprend aussi une bobine s de quelques tours de fil courbés en forme de cercle et servant à l'accouplement inductif de l'ondamètre avec l'antenne ; cette bobine est amovible et est reliée au circuit par les contacts k ; on peut ainsi, en la changeant, réaliser l'accouplement par un plus ou moins grand nombre de tours. Enfin, un tour de fil i induit dans la petite bobine i_1 un courant qui circule dans un fil fin w placé dans le réservoir d'un thermomètre à air h : l'échauffement de ce fil produit une dilatation de l'air, rendue visible par le déplacement d'une colonne liquide contenue dans un tube en U.

Pour employer l'ondamètre, on modifie progressivement la capacité du condensateur, en tournant le bouton moleté, jus-

qu'à ce que l'intensité du courant oscillant atteigne un maximum indiqué par le thermomètre à air. A ce moment, le circuit oscillant est en résonance avec l'antenne, et il suffit de déterminer sa fréquence d'oscillation d'après les valeurs connues de la self-induction et de la capacité.

Tandis que les ondamètres à hélice de fil précédemment décrits permettent seulement de déterminer la longueur d'onde quand la résonance est réalisée, et ne donnent aucune indication quand les conditions de résonance ne sont pas remplies, l'ondamètre de M. Dönitz, ou tout appareil similaire, permet de tracer la courbe de résonance en deçà et au delà de la résonance exacte, ce qui est souvent utile.

Dispositifs de syntonisation.

Une utilisation judicieuse des effets de résonance permet, comme nous l'avons vu, d'augmenter considérablement l'amplitude des oscillations électriques dans les antennes transmettrice et réceptrice, et, par suite, l'intensité des signaux émis ou reçus, c'est-à-dire la portée des communications. En outre, on a espéré pendant longtemps que la réalisation d'une résonance aiguë permettrait aux postes récepteurs de n'être pas influencés par les signaux parasites et par les signaux émanant de postes étrangers. Les inventeurs ont donc été conduits à proposer ou à employer de nombreux dispositifs permettant d'utiliser le plus-complètement possible les effets de résonance : ces dispositifs font partie inhérente des différents systèmes de télégraphie sans fil qui seront décrits brièvement dans le prochain chapitre. Nous allons indiquer seulement ici les principes sur lesquels ils reposent.

Un premier perfectionnement, important au point de vue de la syntonisation, a été réalisé par M. Marconi dans l'adoption du montage de la figure 50, où le détecteur d'ondes est placé dans un circuit oscillant accouplé inductivement avec l'antenne. Un autre perfectionnement, introduit par M. Braun, a consisté dans l'excitation indirecte (par induction) de l'antenne transmettrice.

Au poste transmetteur, la bobine de Ruhmkorff alimente un circuit oscillant contenant un condensateur de capacité variable et le primaire d'un transformateur dont le secondaire, ainsi qu'une bobine d'accord à nombre de spires variable, est intercalé dans l'antenne. Le circuit oscillant fermé et l'antenne doivent être en résonance; un moyen simple pour réaliser cet accord consiste à introduire à la base de l'antenne un ampèremètre thermique et à modifier d'une part le nombre de spires de la bobine d'accord, d'autre part la capacité ou le nombre de tours primaires du transformateur [1], jusqu'à ce que l'aiguille de l'ampèremètre indique une valeur maxima : à ce moment, le circuit oscillant et l'antenne sont en résonance. La bobine de Ruhmkorff a été fréquemment remplacée, dans la suite, par un circuit oscillant alimenté lui-même par un transformateur ordinaire, dont le primaire est relié à une source de courant alternatif.

Au poste récepteur, une bobine de longueur réglable permet d'accorder l'antenne sur la fréquence des ondes émises par le transmetteur; après cette bobine, les oscillations traversent le primaire d'un petit transformateur dont le secondaire fait partie d'un circuit oscillant auquel est relié le cohéreur. L'accord entre ce circuit et l'antenne est obtenu par modification du nombre de tours de la bobine secondaire ou de la capacité du condensateur. Le dispositif de réception est complété par un circuit à courant continu contenant une pile et un relais.

Pour sélectionner le plus possible les signaux et ne laisser parvenir au récepteur que les oscillations d'une fréquence déterminée, on a proposé d'utiliser plusieurs circuits oscillants successifs accouplés inductivement entre eux et accordés les uns sur les autres. M. Hettinger a imaginé le montage que représente la figure 81. La base de l'antenne *1* est reliée à deux bobines de self-induction L_1L_1 toujours identiques. Les extrémités 2 de ces bobines sont connectées ensemble et reliées à la terre. L'ensemble formé par l'antenne et les deux bobines

---

[1] Nous avons vu (chapitre VI, page 64) que, lorsqu'il y a résonance, le rapport de transformation de ce transformateur n'est pas égal au rapport des nombres de tours primaires et secondaires, mais au rapport des capacités du circuit oscillant et de l'antenne.

vibre en quart d'onde. Une capacité C_1 est placée entre les points *1* et *2*, en dérivation sur les deux bobines L_1. Cette capacité a une valeur telle que les deux circuits qu'elle forme avec les bobines L_1 soient en résonance. Enfin, entre un tour de l'une des bobines et un tour quelconque de la seconde bobine, on branche un circuit contenant une self-induction L_2 et une capacité C_2 de valeur telle que la condition de résonance soit encore remplie. Le détecteur D est branché en dérivation sur le condensateur C_2 (si c'est un appareil impressionné par la tension), ou bien est disposé sur le circuit en un point convenable (si c'est un appareil impressionné par le courant).

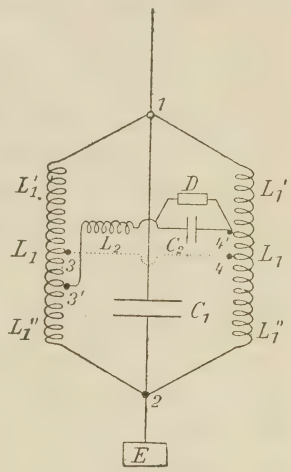


Fig. 81.

Ce dispositif permet d'obtenir une résonance très aiguë. Si l'on fait en sorte que l'amplitude des oscillations qui agissent sur le détecteur, lorsque le maximum de résonance est obtenu, soit juste suffisante pour impressionner cet appareil, il est évident que toute oscillation d'amplitude moindre restera sans effet. Donc les oscillations engendrées dans l'antenne par toute onde dont la fréquence diffère de celle pour laquelle a été réalisé l'accord, auront une amplitude trop faible pour impressionner le détecteur, et ne troubleront pas la réception. Il est facile, avec la disposition adoptée, de réaliser le réglage convenable pour que l'amplitude des oscillations qui agissent sur le détecteur ait la valeur minima juste suffisante pour impressionner l'appareil. En effet, les deux bobines L_1 étant semblables et semblablement placées, deux points situés à la même hauteur sur ces bobines sont au même potentiel. Par conséquent si le pont formé par C_2L_2 et le détecteur est relié à ces deux points (3 et 4 par exemple, figure 81), il n'existe entre ses extrémités aucune différence de potentiel, et aucun courant n'y circule. Si l'on déplace l'un des contacts vers le bas, et l'autre contact vers le haut, en 3′ et 4′ par exemple, il existe, entre les extrémités du circuit qui forme un pont entre les deux bobines, une

différence de potentiel d'autant plus grande que les points 3′ et 4′ sont plus éloignés des points 3 et 4. Il n'est donc pas difficile de trouver la position pour laquelle l'amplitude des oscillations agissant sur le détecteur a la valeur minima nécessaire pour que la sélection soit obtenue.

Tous les dispositifs basés sur l'emploi judicieux des phénomènes de résonance permettent d'accroître considérablement la portée des communications, pour une dépense d'énergie déterminée au poste transmetteur. Mais ils n'empêchent pas le poste récepteur d'être gêné, et quelquefois même paralysé, par l'action des ondes émanant de transmetteurs plus rapprochés ou plus puissants. En effet, supposons que l'amplitude des oscillations engendrées dans le circuit récepteur par l'action d'un transmetteur déterminé soit cent fois plus grande quand les conditions de résonance sont remplies que quand elles ne le sont pas. La quantité d'énergie reçue variant avec le carré de la distance, on voit nettement que les communications peuvent être assurées à une distance dix fois plus grande quand le récepteur et le transmetteur sont en résonance que dans le cas contraire ([1]). Par conséquent, les effets produits sur un poste récepteur A sont exactement les mêmes si les ondes proviennent d'un transmetteur B avec lequel le poste récepteur est accordé, ou si elles proviennent d'un transmetteur C, avec lequel le poste récepteur n'est pas accordé, mais dont la distance est dix fois plus faible (toutes autres conditions étant égales d'ailleurs, c'est-à-dire, entre autres, la quantité d'énergie mise en jeu aux transmetteurs B et C étant la même). Mais alors, si un poste récepteur donné peut, lorsqu'il est bien accordé, recevoir les signaux provenant d'un poste transmetteur situé à 1 000 kilomètres par exemple, il sera influencé de la même manière par les signaux provenant de tous les postes transmetteurs de même puissance compris dans un rayon de 100 kilomètres et sur lesquels il n'est pas accordé. De même, un poste transmetteur situé aussi à 1 000 kilomè-

([1]) Puisque l'énergie reçue varie comme le carré de la distance, elle est cent fois plus faible pour une distance décuple. L'amplitude des oscillations dans le circuit récepteur étant cent fois plus grande dans le cas de la résonance que dans le cas contraire, pour une même quantité d'énergie en jeu, le résultat sera le même que si la distance n'était pas décuplée et si le récepteur n'était pas en résonance.

tres, mais cent fois plus puissant que le transmetteur avec lequel est accordé le poste récepteur, produira sur celui-ci le même effet, bien que l'accord ne soit pas réalisé.

L'utilisation des phénomènes de résonance ne peut donc pas permettre de réaliser la sélection des signaux, et, jusqu'à présent, ce problème n'a pas encore été résolu d'une façon satisfaisante [1]. Néanmoins, certains dispositifs ont donné quelques résultats intéressants. Parmi ceux-ci, on peut citer le principe d'un montage employé par la Compagnie Fessenden (fig. 82). La base de l'antenne A est reliée à deux branches contenant chacune un condensateur (C_1, C_2) et le primaire d'un transformateur (L, L) : ces deux branches se rejoignent et sont reliées à la terre T. Les deux primaires LL sont identiques ; les deux condensateurs ont des capacités légèrement différentes : l'un d'eux a une capacité telle que le circuit formé par l'antenne, sa branche et la prise de terre soit accordé exactement sur la fréquence employée. La capacité de l'autre condensateur diffère de 5 % par exemple de celle du précédent. Les deux secondaires des transformateurs L_1, L_1 sont identiques et sont connectés en opposition dans un circuit contenant un condensateur C et le détecteur d'ondes D. Quand les ondes qui agissent sur l'antenne proviennent du transmetteur avec lequel on doit communiquer, c'est-à-dire quand la fréquence de ces ondes est la même que celle du circuit formé par l'antenne et l'une des branches, il y a résonance, et la majeure partie du courant oscillant engendré

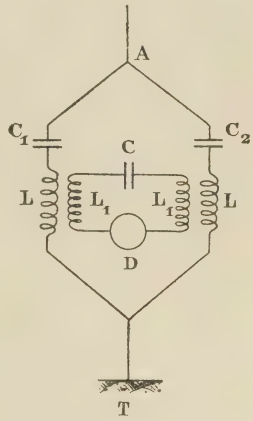


Fig. 82.

[1] Les règlements édictés par la Convention Radiotélégraphique Internationale (1906) présentent un certain nombre de dispositions destinées à réduire autant que possible les chances d' « interférence » entre les signaux émanant des divers postes. Ces règlements ont fixé à 300 et 600 mètres la longueur d'onde des ondes électromagnétiques employées pour la correspondance radiotélégraphique publique. Les postes côtiers ouverts au service public sont tenus de n'employer que l'une de ces longueurs d'onde. Les postes de bateaux, ouverts au service public, sont tenus d'employer une longueur d'onde de 300 mètres.

passe par cette branche ; le secondaire du transformateur correspondant produit alors une force électromotrice dans le circuit du détecteur qui se trouve impressionné. Au contraire, si la fréquence des ondes reçues ne concorde pas avec celle de l'un des circuits formés par l'antenne et l'une des deux branches, le courant oscillant se répartit à peu près également entre les deux branches ; les secondaires des deux transformateurs produisent des forces électromotrices égales et opposées, et le détecteur n'est pas impressionné. On peut régler la capacité de la seconde branche de façon à se débarrasser des signaux perturbateurs ou parasites.

CHAPITRE XI

LES PROGRÈS DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Comme nous l'avons vu, c'est à M. Marconi que revient l'honneur d'avoir établi les premières communications radiotélégraphiques à des distances relativement importantes. Mais, en 1898, plusieurs ingénieurs s'attachaient à l'étude du même problème et leurs travaux aboutissaient à des perfectionnements intéressants qui ont donné naissance aux dispositifs actuels. Nous allons passer rapidement en revue les principaux résultats obtenus par ces expérimentateurs, en nous limitant à ceux qui ont fait l'objet d'applications ultérieures.

Travaux de MM. Slaby et Arco.

M. Slaby a signalé le premier que, dans les montages employés jusqu'alors pour la réception, avec un cohéreur intercalé entre la terre et l'antenne, cet appareil se trouvait à un nœud de tension. Les résultats obtenus malgré cette disposition défectueuse étaient dus, d'après lui, au fait que l'antenne réceptrice n'avait pas exactement la même longueur que l'antenne transmettrice et que, dans ces conditions, des variations de potentiel étaient provoquées à sa base par des ondes parasites issues du transmetteur. M. Slaby a indiqué qu'il faut placer le cohéreur à un ventre de tension, et, pour cela, il a employé le dispositif suivant :

L'antenne réceptrice CD étant connectée en C à une bonne prise de terre (fig. 83), de façon à présenter en ce point un nœud de tension, on lui adjoint un fil horizontal CE de longueur égale à CD. Lorsque l'antenne verticale CD est mise en

vibration par l'action des ondes électromagnétiques, le fil CE entre aussi en vibration, et, comme l'antenne, il présente à son extrémité libre un ventre de tension (l'accroissement de la tension le long de l'antenne ou du fil est figuré en pointillé). Il suffit donc de placer le cohéreur en ce point pour obtenir le maximum d'effet. Si l'antenne réceptrice verticale CD (fig. 84) est plus courte que l'antenne transmettrice, c'est-à-

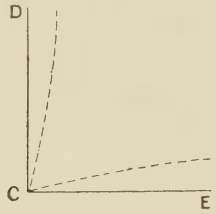


Fig. 83.

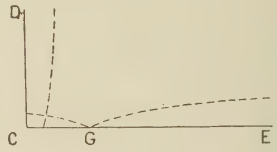


Fig. 84.

dire plus petite que le quart de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique, il se produit un ventre de tension en E sur le fil horizontal, à condition que la longueur totale DCE soit égale à une demi-longueur d'onde et que la liaison à la terre soit faite en G et non en C. Néanmoins, si la liaison à la terre est faite au point C, le ventre de tension qui existe en E n'est que peu affaibli. Enfin, si le fil horizontal est relié à l'antenne en un point situé à une certaine distance de la prise de terre, c'est-à-dire en un point où la tension a déjà une certaine valeur, la longueur de ce fil devra être un peu inférieure au quart de la longueur d'onde pour que son extrémité E présente un ventre de tension, comme on s'en rend compte par l'exa-

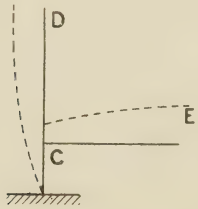


Fig. 85.

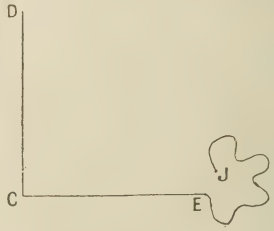


Fig. 86.

men de la figure 85. Le fil CE n'est pas forcément rectiligne : il peut être remplacé par une bobine équivalente.

Le montage de M. Slaby permet d'utiliser comme antenne

un conducteur déjà existant, relié à la terre et convenablement isolé des corps environnants, tel qu'un paratonnerre ou une tige métallique verticale : ce dispositif offre, en outre, l'avantage que les oscillations engendrées dans l'antenne par des perturbations atmosphériques ou des charges statiques s'écoulent à la terre directement sans influencer le cohéreur : en effet, ces oscillations ont une fréquence relativement faible et provoquent des vibrations de faible amplitude sur le fil horizontal, qui n'est pas accordé pour leur fréquence. Si l'on ne dispose pas d'une bonne prise de terre, on peut, comme le montre la figure 86, prolonger encore le conducteur CE par un conducteur (enroulé sous forme d'une bobine) dont la longueur équivaut au quart de la longueur d'onde. On obtient ainsi en J, à l'extrémité de ce conducteur, un nœud de tension, et il suffit d'intercaler le cohéreur entre les points E et J.

Se basant sur les considérations qui précèdent, M. Slaby établissait en 1900 ses postes transmetteur et récepteur de la façon suivante :

Au poste transmetteur, un fil vertical aboutissait à une bonne prise de terre (une conduite d'eau par exemple) : une bobine de réglage B, permettant de modifier à volonté la longueur d'onde, pouvait être intercalée à sa base (fig. 87). Cette antenne était reliée en A à un circuit comprenant un éclateur (alimenté par une bobine de Ruhmkorff), un condensateur C, une bobine de self-induction et une prise de terre. La capacité du conducteur ou la self-induction de la bobine pouvaient être modifiées pour les réglages.

Au poste récepteur (fig. 88), un conducteur vertical analogue à l'antenne transmettrice était relié à un circuit contenant une bobine invariable V, une bobine d'accord M, le cohéreur, une pile, un relais et une prise de terre : un condensateur, branché en dérivation sur la pile et le relais, offrait un chemin de passage aux oscillations électriques. En reliant à un même conducteur aérien deux circuits oscillants prévus pour des longueurs d'onde sensiblement différentes, les inventeurs ont pu, grâce à un accord convenable, recevoir simultanément les signaux de deux postes transmetteurs distincts travaillant avec des longueurs d'onde différentes.

En examinant les figures 87 et 88, on voit que le montage employé par MM. Slaby et Arco est exactement équivalent au montage représenté schématiquement par la figure 73, dans

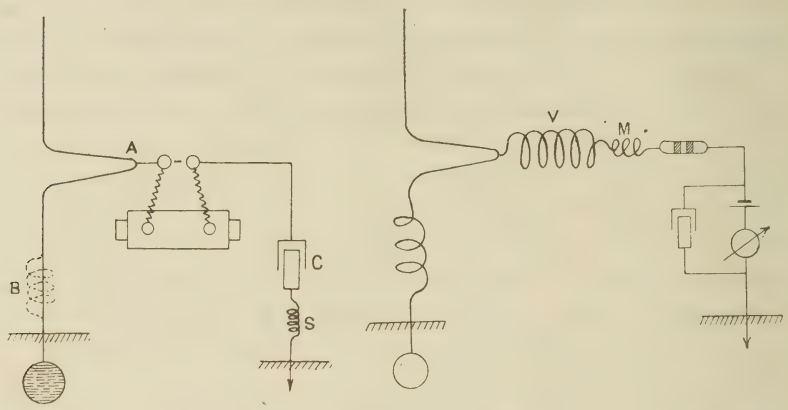


Fig. 87. Fig. 88.

lequel un circuit oscillant fermé est directement accouplé avec l'antenne. En effet, le circuit oscillant est complété par le sol compris entre les deux prises de terre, qui joue le même rôle qu'un conducteur métallique.

Travaux de M. Braun.

M. Braun a eu le mérite de signaler, dès 1898, que, pour diminuer autant que possible l'absorption subie par les ondes électromagnétiques entre le poste transmetteur et le poste récepteur, il fallait augmenter la longueur d'onde de ces ondes, c'est-à-dire diminuer la fréquence des oscillations électriques qui les engendrent. Pour cela, il a été conduit à augmenter la capacité en jeu dans le système oscillant, et, ne pouvant réaliser cette augmentation avec le montage à excitation directe (antenne simple de M. Marconi), il a imaginé d'accoupler inductivement l'antenne avec un circuit oscillant fermé (montage schématique de la figure 74). Ce dispositif permet de mettre une plus grande quantité d'énergie en jeu, puisque, pour une tension déterminée, celle-ci croît avec la capacité du système oscillant :

en outre, les oscillations engendrées sont beaucoup moins amorties qu'avec le montage à excitation directe, ce qui est nécessaire pour réaliser une syntonisation relative ; enfin on arrive à une meilleure utilisation de l'énergie primaire dépensée, si l'on accorde l'antenne et le circuit primaire de façon à obtenir une résonance prononcée (1).

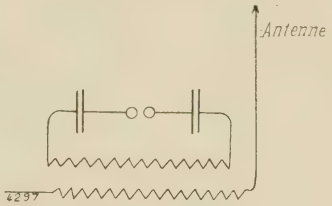


Fig. 89.

Le montage des postes transmetteurs de ce système employés en 1899 est indiqué par la figure 89. Le circuit oscillant fermé (dont l'éclateur est relié au secondaire d'une bobine d'induction) contient des condensateurs de capacité convenable et le primaire d'un transformateur dont le secondaire est embroché entre l'antenne et la terre. M. Braun a indiqué aussi des dispositions basées sur l'emploi de l'accouplement direct du circuit oscillant avec l'antenne. Les figures 90 et

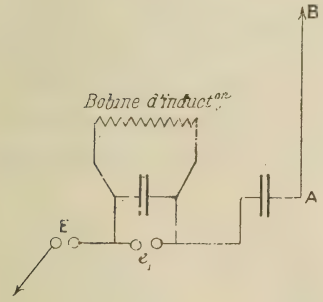


Fig. 90.

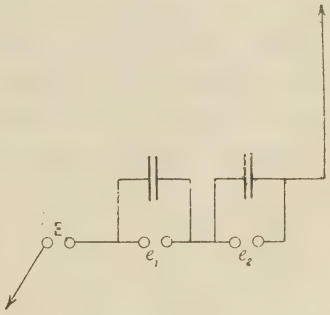


Fig. 91.

91 représentent deux de ces dispositions, dans lesquelles un éclateur supplémentaire E est intercalé sur le fil de jonction à la terre.

Pour augmenter aussi la capacité de l'antenne, M. Braun a indiqué l'emploi d'antennes multiples (universellement adoptées maintenant dans les postes puissants) formées d'un grand nombre de fils disposés sous forme de réseaux, de harpes, de cônes, de pyramides, etc., de façon à embrasser le plus d'espace possible.

Dans la suite, l'auteur a employé l'un des trois modes d'ac-

(1) Pour la réception, le montage par induction offre l'avantage que les signaux parasites vont directement à la terre sans agir sur le circuit récepteur.

couplement suivants entre le circuit fermé et l'antenne : accouplement par induction (fig. 89), accouplement direct (fig. 92), ou combinaison des deux (fig. 93). D'après lui, ces dispositifs

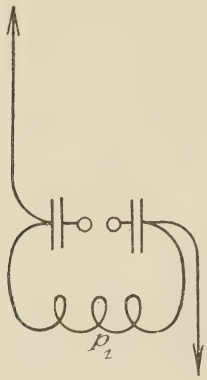


Fig. 92.

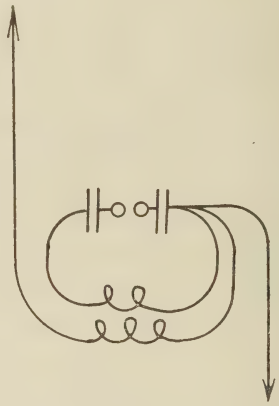


Fig. 93.

sont équivalents et ne se distinguent que par les plus ou moins grandes facilités qu'ils présentent pour le choix du degré d'accouplement. Pour accroître la tension de charge sans modifier la fréquence, l'inventeur a imaginé une série de montages à éclateurs multiples dont les figures 94, 95 et 96 donnent une

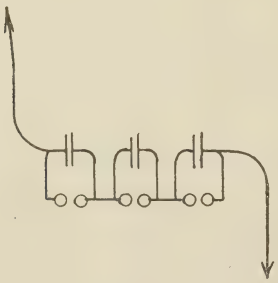


Fig. 94.

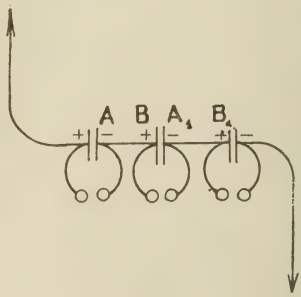


Fig. 95.

idée. Chacun des différents éclateurs est relié au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff unique ; pour la charge, les condensateurs sont groupés en parallèle ; pour la décharge, ils se trouvent groupés en série, et la tension est ainsi accrue propor-

tionnellement au nombre de condensateurs employés. Les montages des figures 97 et 98 sont équivalents aux précédents et montrent l'un l'accouplement par induction, l'autre l'accou-

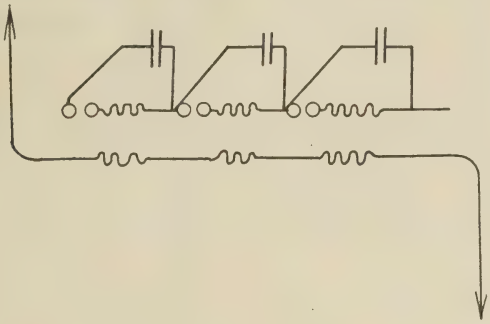


Fig. 96.

plement direct du circuit oscillant avec l'antenne. Chacun des éclateurs f_1, f_2, f_3 est relié au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff commune ; les condensateurs C_1, C_2, C_3 se trouvent groupés en parallèle pour la charge et en série pour la dé-

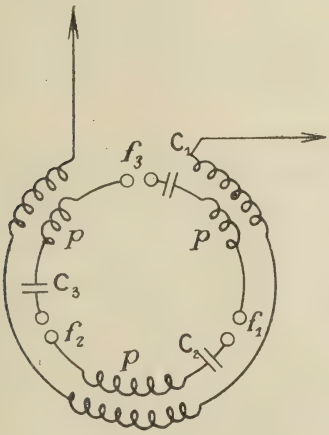


Fig. 97.

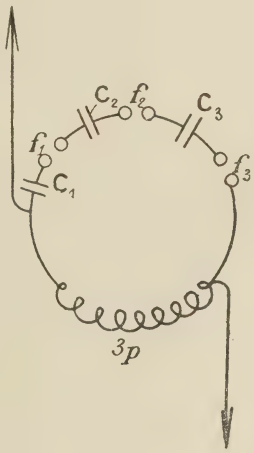


Fig. 98.

charge ; dans le montage de la figure 97, les primaires p de transformateurs convenables agissent par induction sur les secondaires correspondants, reliés en série et embrochés sur l'antenne.

En 1902, M. Braun a établi, pour l'armée allemande, des postes transportables de télégraphie sans fil. Les montages employés sont représentés par les figures 99 et 100. Au transmetteur, une bobine d'induction alimente le circuit oscillant ec_1pc_2, accouplé inductivement avec l'antenne ab ; au poste récepteur, l'antenne dc_3e est accouplée inductivement avec un circuit oscillant contenant un condensateur et le cohéreur ; la pile et le relais sont branchés en dérivation sur ce dernier. Pour éviter l'emploi d'une prise de terre, l'inventeur a eu recours à une disposition symétrique, le fil sb, de longueur égale au quart de la longueur d'onde, équilibrant le fil aérien sa de même longueur, de façon qu'il se produise des ventres d'oscillation en a et b, et un nœud d'oscillation en s. En pratique, le fil inférieur était remplacé par une plaque métallique présentant une capacité équivalente. La même disposition était adoptée au poste récepteur.

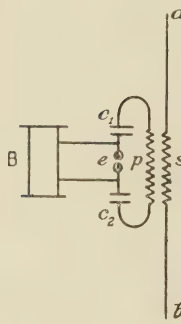


Fig. 99.

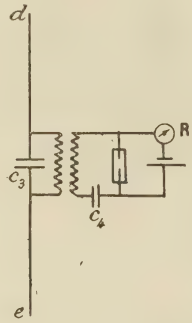


Fig. 100.

Depuis 1904, les sociétés exploitant les brevets Slaby-Arco et les brevets Braun ont fusionné et ont constitué la « Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie ». Le système adopté par cette société a été nommé Système Telefunken, et sera étudié au chapitre suivant, relatif aux montages actuellement employés en pratique.

Travaux de MM. Lodge et Muirhead.

Ces inventeurs se sont efforcés de réaliser un radiateur susceptible de produire une série d'oscillations persistantes. Dans leurs premiers brevets (1897) ils ont décrit un transmetteur et un récepteur composés chacun de deux cônes métalliques creux placés verticalement et opposés l'un à l'autre par les sommets.

Les deux moitiés symétriques de l'ensemble ainsi formé étaient soigneusement isolées du sol : au poste transmetteur, chacune d'elles était connectée à l'une des boules de l'éclateur ; au poste récepteur, chacune d'elles était reliée au circuit du cohéreur, qui contenait, comme récepteur-enregistreur, un siphon-recorder (1).

Ensuite, MM. Lodge et Muirhead ont employé, au circuit transmetteur et au circuit récepteur, un accouplement direct de l'antenne avec un circuit oscillant fermé, contenant un condensateur et une bobine de self-induction. Le montage du poste transmetteur est indiqué par la figure 101 : l'antenne A est cou-

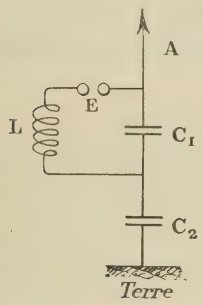
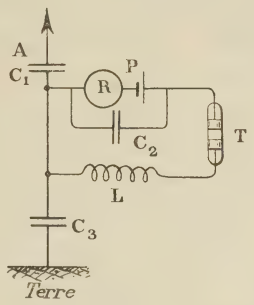


Fig. 101.



Fig, 102.

pée par un condensateur C_1, puis aboutit à l'une des armatures d'un condensateur C_2 de grande capacité, dont l'autre armature est connectée à la terre. Le circuit oscillant fermé LEC_1, comprenant l'éclateur E (alimenté par une bobine), la bobine de self-induction L et le condensateur C_1, est directement accouplé avec l'antenne et le réglage est fait de façon qu'il y ait résonance : ce montage est équivalent à celui que représente schématiquement la figure 73. Au poste récepteur, l'antenne est coupée par un condensateur C_1, puis aboutit, comme précédemment, à un condensateur de terre C_3. Le circuit oscillant fermé, relié à l'antenne, comprend le condensateur C_2, le

(1) Appareil de grande sensibilité employé sur les câbles télégraphiques sous-marins

cohéreur T [1] et la bobine de self-induction L. Le relais R et la pile P sont montés en dérivation sur le condensateur C_2.

Ce qu'il y a lieu de remarquer dans les montages employés par MM. Lodge et Muirhead, c'est que les antennes ne sont pas reliées directement à des prises de terre, mais aboutissent à des capacités reliées à la terre. En pratique, ces capacités sont formées de filets métalliques de grande surface posés sur le sol : le contact entre ces filets et la terre présentant une résistance électrique élevée, l'ensemble se comporte comme un condensateur dont une armature est constituée par la terre et l'autre par le filet métallique. Des expériences, faites en isolant le filet par des supports de faible hauteur, ont montré que, dans ces conditions où l'on a bien réellement affaire à un condensateur, les résultats obtenus sont meilleurs que quand le filet est en contact avec le sol, et sont meilleurs aussi qu'avec une prise de terre médiocre. L'emploi de filets métalliques à la base des antennes est donc tout indiqué pour les postes où, par suite de la nature du terrain (rocheux ou très sec), il n'est pas possible d'établir une bonne prise de terre : de même, pour les postes transportables, tels que ceux employés dans les applications militaires, ce dispositif est recommandable. Quelquefois, MM. Lodge et Muirhead munissent la partie supérieure de l'antenne d'une capacité superficielle semblable à la capacité inférieure : cette capacité est aussi formée d'un réseau ou d'un filet métallique. Cette disposition permet d'obtenir des communications satisfaisantes avec une faible hauteur d'antenne.

En 1903, MM. Lodge et Muirhead ont établi, pour l'armée anglaise, des postes transportables permettant de communiquer à 30 kilomètres environ. La forme donnée à la partie supérieure de l'antenne est représentée par la figure 103 : la hauteur totale est de 15 mètres. La capacité inférieure remplaçant la prise de terre est constituée par un filet de fils de cuivre et par de petites plaques métalliques posées sur la terre. Le mon-

---

[1] On a représenté le cohéreur sous forme d'un tube dans cette figure schématique, mais, comme on l'a vu au chapitre IX, MM. Lodge et Muirhead ont employé un cohéreur formé d'une surface de mercure, recouverte d'une mince couche d'huile et contre laquelle frottait légèrement un disque en fer. Ce détecteur était auto-décohérent.

tage des circuits du poste transmetteur et du poste récepteur est représenté par les figures 104 et 105. Pour la transmission, l'antenne est reliée à l'une des boules d'un éclateur alimenté

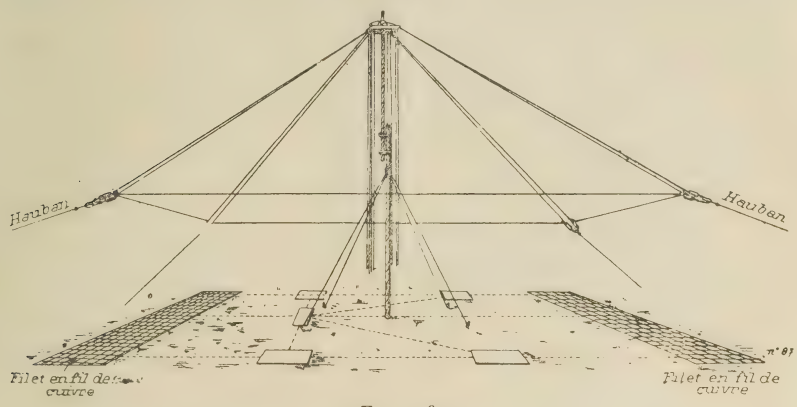


Fig. 103.

par une bobine de Ruhmkorff ; l'autre boule est connectée à la capacité de terre par l'intermédiaire d'un condensateur et d'une bobine de self-induction. Pour la réception, elle est reliée au

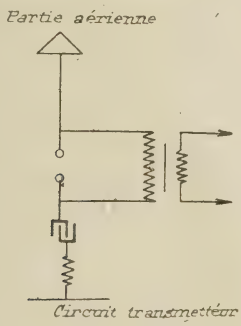


Fig. 104.

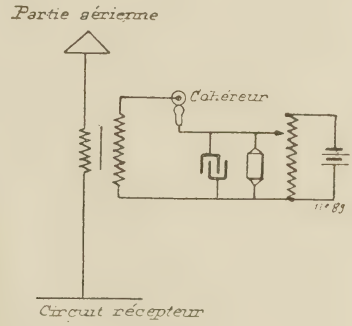


Fig. 105.

primaire d'un transformateur dont le secondaire fait partie d'un circuit oscillant contenant le cohéreur à disque tournant et un condensateur ; sur ce dernier est branché le récepteur télégraphique (siphon-recorder) et un potentiomètre.

Travaux de M. Fleming.

M. Fleming, collaborateur de M. Marconi, a contribué pour

une large part aux études faites en vue de l'établissement de postes de grande puissance. Le dispositif transmetteur qu'il a réalisé est représenté par la figure 106. Un circuit oscillant

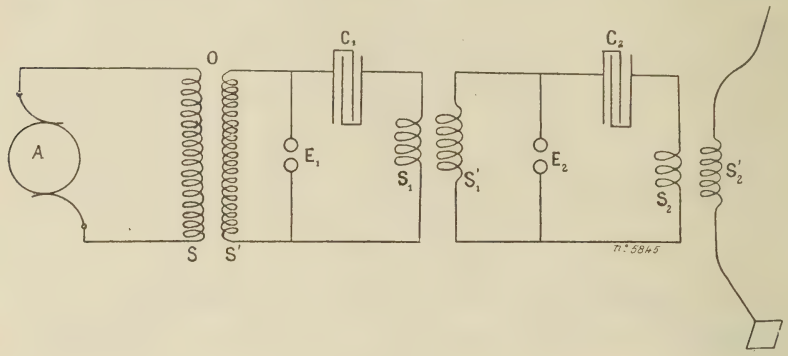


Fig. 106.

fermé est alimenté par un transformateur industriel à haute tension SS′ dont le primaire est relié à un générateur électrique A à courant alternatif : ce dispositif (indiqué pour la première fois par M. Blondel) permet de mettre en jeu une quantité d'énergie infiniment plus considérable qu'avec une ou plusieurs bobines de Ruhmkorff. Le circuit oscillant comprend un éclateur E_1, un condensateur C_1 et une bobine S'_1 qui agit, par induction mutuelle, sur la bobine S'_1 d'un second circuit oscillant fermé : celui-ci contient un éclateur E_2, une capacité C_2, et la bobine primaire S_2 d'un transformateur dont le secondaire S'_2 est embroché entre l'antenne et la terre. En outre, le circuit qui relie l'alternateur au primaire S du transformateur contient deux bobines L_1L_2 à noyaux de fer H_1H_2, dont on peut modifier la self-induction en enfonçant plus ou moins les noyaux (fig. 107). Ce dispositif a pour but d'empêcher la formation, entre les boules de l'éclateur E_1, d'un arc alimenté par le courant alternatif du générateur A [1]. Comme l'indique la figure 107, l'une

[1] Lorsqu'une étincelle jaillit en E_1 par suite de la décharge du condensateur C_1, d'après le mécanisme étudié en détail au chapitre v, page 43, le secondaire S′ du transformateur se trouve fermé sur le circuit conducteur constitué par l'éclateur et l'étincelle et présentant une très faible résistance. Si le générateur A était relié directement au primaire du transformateur S, l'intensité du courant circulant dans le circuit secondaire $S'E_1$ atteindrait une grande intensité par suite de la faible résistance de ce circuit : toute la puissance que peut débiter la machine A serait absorbée

des deux bobines de self-induction est court-circuitée par un interrupteur que l'on manœuvre pour l'émission des signaux. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la self-induction de cette bobine est suffisamment élevée pour réduire à une très faible valeur l'intensité du courant qui alimente le primaire du transformateur ; quand, au contraire, il est fermé, le courant passe par cette connexion directe, et il atteint l'intensité convenable pour que les oscillations engendrées donnent lieu à des ondes suffisamment puissantes.

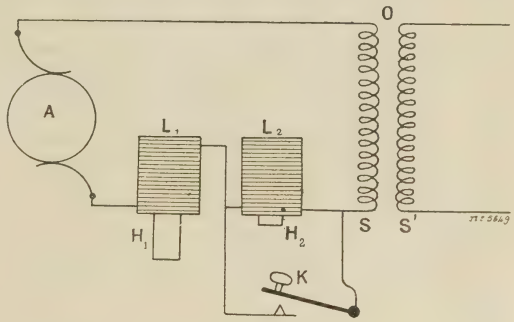


Fig. 107.

L'emploi de deux circuits oscillants permet d'accorder entre eux les différents circuits de façon à obtenir une bonne résonance. Le circuit oscillant $S'C_1S_1$ est accordé sur la fréquence du courant alternatif produit par le générateur A, ou, autrement dit, il est en résonance avec le circuit formé par le générateur et le primaire S du transformateur. Le circuit oscillant $E_1C_1S_1$ est en résonance avec le circuit $S'_1C_2S_2$, et le circuit $E_2C_2S_2$ est en résonance avec l'antenne qu'il excite par l'intermédiaire du transformateur $S_2S'_2$.

---

pour le maintien de l'arc amorcé entre les sphères de l'éclateur E_1, et cet arc ne s'éteindrait plus. Par suite, la recharge du condensateur C_1 ne pourrait plus s'effectuer, et le dispositif n'engendrerait plus d'oscillations électriques. Si, au contraire, on intercale des bobines de self-induction entre le générateur A et le primaire du transformateur, l'action de ces bobines s'oppose, comme nous l'avons vu, à toute augmentation brusque du courant, et il ne peut pas s'établir en E_1 un arc suffisamment tenace pour empêcher le mécanisme d'échange d'énergie qui donne lieu, dans le circuit oscillant, à la production d'oscillations électriques. Au lieu d'intercaler des bobines de self-induction, on peut employer comme transformateur SS' un appareil présentant une très forte dispersion (chapitre IV, page 40) qui agit comme une self-induction : un tel appareil est muni d'un circuit magnétique ouvert (c'est-à-dire un simple noyau de fils de fer, comme dans une bobine de Ruhmkorff) au lieu d'un circuit magnétique fermé. On pourrait aussi, mais cela est moins avantageux, remplacer les bobines de self-induction par une résistance de valeur élevée.

Pour éviter l'emploi d'un interrupteur servant à émettre les signaux, M. Fleming a imaginé de laisser jaillir continuellement les étincelles entre les sphères de l'éclateur E_1 et de diriger entre les boules de cet éclateur, lorsque l'on veut donner naissance à un train d'ondes, un jet d'air comprimé fourni par une soufflerie. Tant que ce jet d'air n'agit pas, l'arc électrique persiste entre les boules de l'éclateur et est alimenté par le courant du générateur A ; lorsque le jet d'air agit, l'arc, violemment soufflé, ne peut se maintenir, et des oscillations puissantes sont engendrées. Le dispositif qui permet de faire agir d'une façon intermittente le jet d'air comprimé consiste en un tube pivotant autour d'un axe et maintenu par un ressort : quand on fait basculer le tube, son orifice est dirigé vers l'intervalle de l'éclateur ; dans la position normale, sa direction est différente.

Travaux de M. J. Stone Stone.

M. J. S. Stone a été l'un des premiers à adopter l'accouplement par induction de l'antenne transmettrice ou réceptrice avec un circuit oscillant fermé. Il semble aussi que, l'un des premiers, il ait vu le parti que l'on peut tirer des phénomènes de résonance et indiqué la nécessité d'accorder les circuits de façon à profiter de ces phénomènes. Il s'est surtout préoccupé de réaliser une syntonisation convenable, et s'est efforcé d'établir des appareils permettant de produire et d'utiliser des ondes électromagnétiques d'une fréquence unique bien déterminée.

Le système transmetteur qu'il a réalisé dans ce but est représenté par la figure 108 : le secondaire B d'une bobine de Ruhmkorff (dont le primaire est représenté sur la figure, ainsi que son condensateur et sa pile) est relié à l'éclateur S : le circuit $SA'L'C'$, ainsi mis en vibration, agit par induction sur le circuit $A^2C''A^3L''$, qui ne contient pas d'éclateur et n'agit que pour accentuer les phénomènes de résonance. Enfin, ce dernier circuit est accouplé inductivement en A^3A^4 avec l'antenne V qui contient à sa base une bobine d'accord reliée à la terre E. Les deux circuits oscillants $C'SA'L'$ et $A^2C''A^3L''$ sont

accordés ensemble ; afin d'obtenir dans l'antenne des oscillations d'une fréquence unique, on peut, comme l'a indiqué l'inventeur, ou bien accorder l'antenne avec le circuit oscillant inducteur, en employant un accouplement très lâche, ou bien ne pas accorder l'antenne avec le circuit oscillant, et lui faire

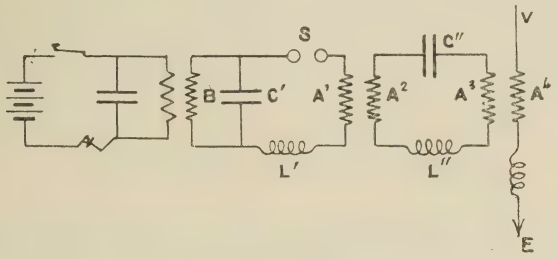


Fig. 108.

effectuer des oscillations forcées, en employant un accouplement rigide. Enfin, M. Stone a indiqué aussi que si, avec un accouplement relativement rigide, l'antenne est accordée sur la fréquence propre d'oscillation des circuits inducteurs, on peut affaiblir la réaction qu'elle exerce sur eux (1), en introduisant une bobine de self-induction convenable dans le circuit qui contient l'éclateur.

Le système récepteur de M. Stone est établi pour répondre aux ondes d'une fréquence unique bien déterminée et n'être

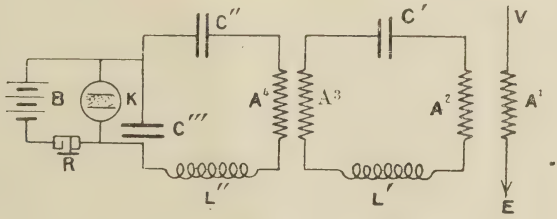


Fig. 109.

pas influencé par les ondes de fréquences différentes : il comprend aussi un certain nombre de circuits résonants accordés sur la fréquence convenable, et disposés comme l'indique la figure 109. L'antenne V aboutit au primaire A^1 d'un transfor-

(1) Et qui donne lieu, comme on se le rappelle, à deux groupes d'oscillations de fréquences différentes.

mateur dont le secondaire A^2 fait partie du circuit oscillant $A^2C'A^3L'$. Celui-ci est accouplé inductivement, en A^3A^4, avec le circuit $A^4C''C'''L''$. Enfin les armatures du condensateur C''', intercalé dans ce circuit, sont reliées au système récepteur. L'inventeur a trouvé que l'emploi d'un cohéreur comme détecteur ne permet pas d'obtenir de résultats suffisamment satisfaisants au point de vue de la syntonisation : il a été conduit à se servir d'un bolomètre ou d'un récepteur thermo-électrique.

Travaux de M. Fessenden.

Cet inventeur a proposé d'employer une antenne transmettrice multiple de grande surface, couvrant plusieurs maisons et présentant une capacité élevée : cette antenne est excitée directement par les étincelles jaillissant entre les sphères d'un éclateur intercalé sur elle : un conducteur de self-induction réglable est disposé sur le fil de terre, et peut être mis en court-circuit par un interrupteur. Pour émettre des signaux, on agit sur cet interrupteur, en laissant la bobine de Ruhmkorff fonctionner d'une façon continue : suivant la position de cet interrupteur, le conducteur de forte self-induction est intercalé sur le fil de terre ou est mis en court-circuit, et les ondes produites ont ou n'ont pas la fréquence convenable pour impressionner les appareils du poste récepteur.

Le système récepteur comprend une antenne multiple, un condensateur, un bolomètre relié à un récepteur téléphonique, et un conducteur de forte self-induction réglage connecté à un fil de terre. Comme il arrivait souvent que le bolomètre de service fût brûlé par le passage d'un courant oscillant d'intensité trop élevée, l'inventeur a placé sous un plateau circulaire un certain nombre de bolomètres aboutissant à une série de contacts : il suffisait, lorsqu'un de ces appareils était brûlé, de faire tourner légèrement le plateau autour d'un axe central pour qu'un autre bolomètre fût mis en service à la place du premier. Comme nous l'avons vu au chapitre IX, l'inventeur a établi dans la suite une sorte de bolomètre à colonne liquide, offrant l'avantage de ne pouvoir être détérioré par une inten-

sité de courant exagérée : sous sa dernière forme, cet appareil appartient à la catégorie des détecteurs électrolytiques.

Travaux de M. de Forest.

M. de Forest s'est particulièrement attaché, en 1900, à l'étude des détecteurs d'ondes et a établi l'anticohéreur décrit au chapitre IX. Au poste transmetteur, il a employé l'accouplement direct d'un circuit oscillant fermé et de l'antenne. Ce montage est représenté par la figure 110 : un générateur à cou-

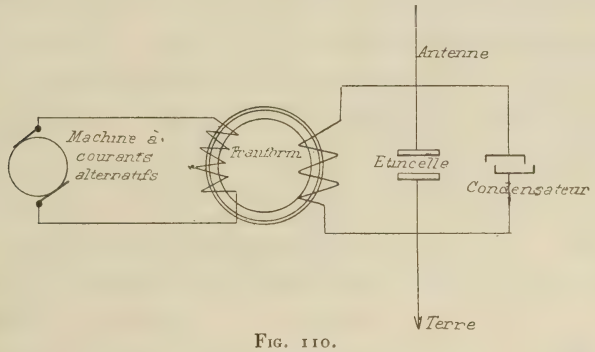


FIG. 110.

rant alternatif alimente le primaire d'un transformateur dont le secondaire est relié au système oscillant formé par l'antenne, l'éclateur, un condensateur et un fil de terre. Les électrodes de l'éclateur, entre lesquelles jaillissent les étincelles, sont constituées par deux disques métalliques parallèles. Plus tard, M. de Forest a remplacé l'accouplement direct de l'antenne et du circuit oscillant par un accouplement par induction.

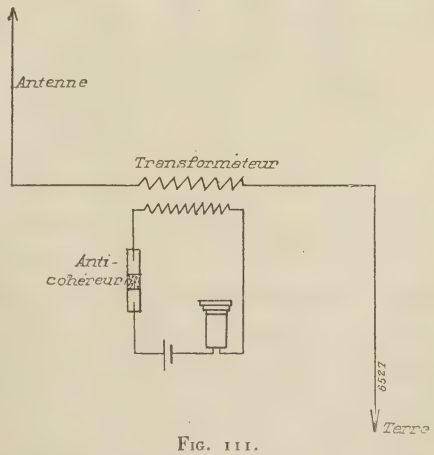


FIG. 111.

Le montage employé au poste récepteur est représenté par la figure 111. L'antenne agit par induction sur un circuit contenant l'anticohé-

reur (décrit au chap. IX), l'écouteur et la pile. Au lieu d'un récepteur téléphonique, l'inventeur a employé aussi un relais et un récepteur Morse.

Travaux de MM. Blondel, Ferrié, Tissot, Ducretet et Rochefort.

Dès 1898, M. Blondel s'est occupé de la télégraphie sans fil et on lui doit plusieurs dispositifs judicieux qui ont servi de point de départ dans l'établissement de différents systèmes : au point de vue théorique, il a donné de très intéressantes indications sur le fonctionnement des antennes et sur le mécanisme de la production des ondes électromagnétiques.

M. le capitaine Ferrié, appelé dès les premières expériences de M. Marconi à s'occuper du nouveau mode de communication par ondes hertziennes, a fait de très remarquables expériences et a établi des postes de radiotélégraphie simples et pratiques. Ses travaux, poursuivis avec une grande habileté, ont contribué à mettre en lumière un certain nombre de faits et ont été d'une incontestable utilité. Il a étudié pour l'armée des postes fixes et des postes mobiles de campagne avec lesquels des communications sont assurées entre les principales places fortes. Récemment, il a installé, à la tour Eiffel, une station radiotélégraphique capable d'envoyer des messages à plus de 2 000 kilomètres: les appareils récepteurs de cette station enregistrent les signaux provenant des stations étrangères de grande puissance.

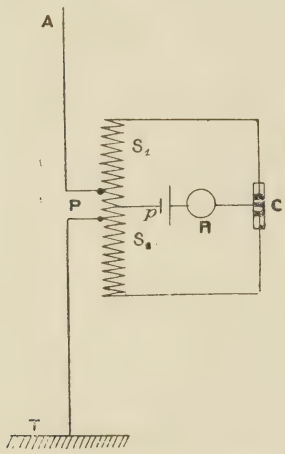


Fig. 112.

M. le lieutenant de vaisseau Tissot a fait d'intéressantes recherches, en particulier sur l'étincelle oscillante et sur les phénomènes en jeu dans les antennes, ainsi que sur les détecteurs d'ondes des différents types.

M. Ducretet, aussitôt après les expériences de M. Popoff, a perfectionné les appareils de ce savant et a établi le système Popoff-Ducretet, avec antenne à excitation directe et cohéreur

à connexion directe. Il a fait, en 1899, dans Paris même, des expériences de communication entre le Panthéon et la Tour Eiffel.

Enfin, M. Rochefort a établi un système transmetteur analogue au premier système Marconi, et un système récepteur dans lequel le cohéreur est placé nettement à un ventre de tension, comme dans le système Slaby et dans le système Marconi à jigger. La figure 112 indique le montage employé : le cohéreur est muni de deux électrodes extrêmes et d'une électrode médiane [1], présentant entre elles deux espaces partiellement remplis de limaille. Le fil aérien aboutit à la portion centrale P d'une bobine qui comprend deux autres portions S_1 et S_2. On voit que l'antenne et le circuit oscillant fermé sont accouplés directement et par induction. Les extrémités des portions S_1S_2 de la bobine sont reliées aux électrodes extrêmes du cohéreur : le point central est relié, par un circuit contenant une pile et un relais, à l'électrode centrale du cohéreur C. Il suffit d'examiner la figure 112 pour comprendre le fonctionnement de ce dispositif.

Travaux de M. Artom.

M. Artom a inventé un système de télégraphie sans fil permettant d'envoyer des ondes dans une direction déterminée. Le transmetteur comprend deux antennes placées en croix perpendiculairement l'une à l'autre : chacune de ces antennes est le siège d'oscillations de même fréquence, mais dont les phases diffèrent d'un quart de période. Les ondes produites par la combinaison des perturbations électromagnétiques engendrées par les deux antennes présentent la propriété de se propager suivant une direction perpendiculaire au plan des deux antennes croisées. Pour produire des oscillations dont les phases diffèrent d'un quart de période, l'inventeur emploie deux circuits oscillants combinés ensemble et reliés à un éclateur à trois électrodes : l'un des circuits contient un condensateur et l'autre une bobine de self-induction ; tous deux agissent inductivement sur les antennes.

---

[1] Cet appareil est exactement équivalent à deux cohéreurs reliés en série.

Travaux de M. Poulsen.

Le système de M. Poulsen repose sur l'emploi d'oscillations entretenues, produites par le dispositif étudié au chapitre v. L'arc électrique jaillit entre des charbons horizontaux de fort diamètre tournant lentement autour de leur axe, de façon que sa longueur ne varie pas sensiblement par suite de la combustion des électrodes [1]. L'arc est enfermé dans un récipient dans lequel de l'hydrogène ou du gaz d'éclairage est amené par le bas; un champ magnétique, produit par un électro-aimant, exerce sur lui un soufflage énergique. Le montage employé pour la transmission est indiqué par la figure 113.

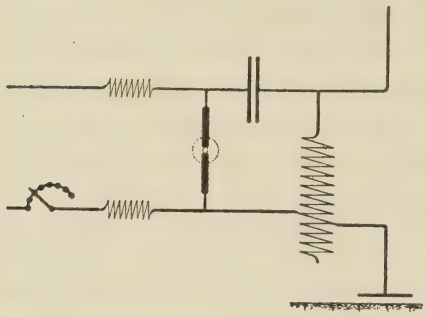


Fig. 113.

Un circuit à courant continu, contenant deux bobines de self-induction, alimente l'arc sur lequel est branché un circuit oscillant composé d'un condensateur et d'une bobine de self-induction réglable. L'antenne est accouplée directement avec ce circuit sur la bobine elle-même, comme le montre la figure: la prise de terre est remplacée par une plaque ou un réseau métallique formant avec le sol un condensateur. Pour l'émission des signaux, on manœuvre un interrupteur qui établit ou rompt la connexion de l'antenne.

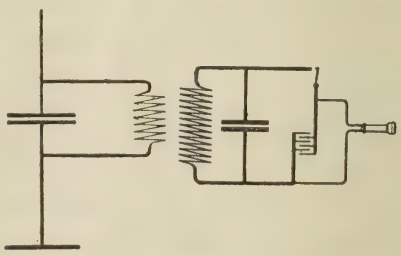


Fig. 114.

Au poste récepteur, l'inventeur emploie le montage indiqué par la figure 114. Un circuit oscillant est accouplé, d'une façon aussi lâche que possible, avec l'antenne qui se ter-

[1] Ces charbons sont changés lorsqu'ils ont effectué une rotation complète, et on retaille leurs extrémités de façon que les bords soient bien nets.

mine par une plaque de capacité. Ce circuit oscillant présente le plus faible amortissement possible. Le détecteur d'ondes, ou un simple récepteur téléphonique, est branché d'une façon intermittente sur ce circuit par un appareil spécial qui établit et rompt périodiquement la connexion. On permet ainsi au circuit oscillant de vibrer librement sans amortissement, puis on intercale brusquement le détecteur, et l'on profite de l'énergie accumulée pendant un court intervalle de temps, après quoi le détecteur est mis hors circuit. L'établissement et la rupture de ces contacts intermittents se succèdent avec une grande rapidité.

Des postes radiotélégraphiques, établis en 1905 et 1906 avec ce système, ont présenté un fonctionnement satisfaisant et l'accord obtenu entre le récepteur et le transmetteur a été très précis.

CHAPITRE XII

L'ÉTAT ACTUEL DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Nous avons suivi, dans le chapitre précédent, les progrès réalisés grâce aux travaux de différents expérimentateurs. Il serait injuste de ne pas mentionner, à côté de ces travaux qui ont donné des résultats pratiques immédiats, les travaux théoriques remarquables de MM. Poincaré, Wien, Drude, Abraham, Oberbeck, Bjerkness, Seibt, Zenneck, Pierce et Ives, qui ont permis de mettre en lumière et d'expliquer certains phénomènes obscurs ou mal connus, et ont ainsi contribué pour une large part au développement de la télégraphie sans fil.

Nous allons passer rapidement en revue les différents systèmes employés actuellement dans les postes radiotélégraphiques ouverts au service public, puis nous examinerons les dispositions adoptées dans les plus puissants de ces postes.

Systèmes employés actuellement dans les postes radiotélégraphiques ouverts au service public.

Il est souvent un peu difficile de connaître, dans leurs moindres détails, les dernières dispositions adoptées par les compagnies qui exploitent les postes radiotélégraphiques des différents systèmes ; néanmoins, il est possible d'indiquer les parties essentielles des montages employés.

Système Telefunken. — La Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie, qui exploite, sous le nom de système Telefunken, les inventions de MM. Slaby, Arco et Braun, a installé dans les trois dernières années un grand nombre de postes en différents

points du globe. Son système, basé sur les résultats des plus récentes études théoriques et pratiques, est remarquablement perfectionné.

L'antenne est composée d'un grand nombre de conducteurs aériens embrassant le plus d'espace possible. Ces conducteurs sont disposés, soit sous forme d'une harpe, soit sous forme d'un cône ou d'une pyramide, soit sous forme d'un cône ou d'une pyramide renversés, soit sous forme d'un double cône, soit enfin, pour les bateaux, sous forme d'un T dont la branche horizontale supérieure est constituée par un faisceau de conducteurs parallèles tendus entre les deux grands mâts. Les conducteurs aériens ont une forte section et sont formés de torsades de fils fins isolés présentant une très faible résistance électrique, afin que l'amortissement soit aussi réduit que possible.

La prise de terre est fréquemment remplacée par un réseau de fils isolés du sol et formant avec celui-ci un condensateur de capacité élevée. Les expériences faites par la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie ont montré que, dans un grand nombre de cas, l'emploi d'une telle capacité, formant contrepoids à l'antenne, doit être préféré à l'emploi d'une prise de terre, car les résultats obtenus sont plus uniformes et sont indépendants de l'état d'humidité du sol.

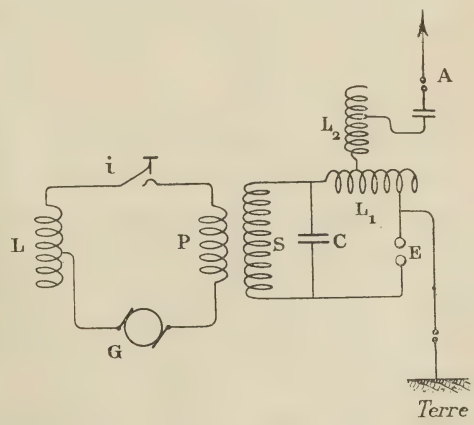


Fig. 115.

La disposition des circuits servant à la transmission est représentée schématiquement par la figure 115. Un générateur G à courant alternatif alimente un circuit contenant une bobine de self-induction réglable L, un interrupteur *i*, et le primaire d'un transformateur industriel P. Le secondaire de cet appareil est

relié à un circuit oscillant composé d'une batterie de condensateurs C, d'un éclateur E et d'une bobine de self-induction réglable L_1. Sur la bobine L_1 est branchée une autre bobine réglable L_2 à laquelle est connecté le fil de jonction allant à l'antenne A : l'accouplement ainsi réalisé entre le circuit oscillant fermé et l'antenne est un accouplement lâche. Le fil aérien est interrompu par un condensateur et un petit éclateur : au delà de cet éclateur est dérivé un conducteur allant à un parafoudre (1).

La disposition des appareils servant à la réception est représentée schématiquement par la figure 116, pour un poste muni seulement du détecteur électrolytique. L est une bobine d'accord à laquelle aboutit l'antenne, C est un condensateur sur lequel est accouplé le circuit récepteur, F est le détecteur électrolytique, T un récepteur téléphonique, W une résistance reliée à la batterie de piles B et permettant de faire agir sur le détecteur électrolytique une différence de potentiel de valeur convenable (potentiomètre).

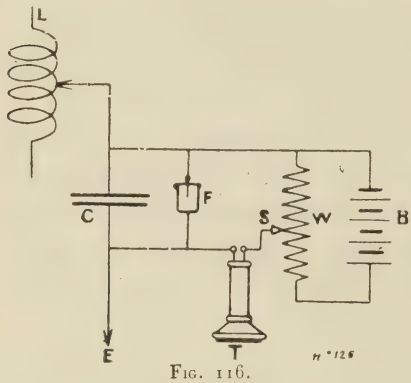


Fig. 116.

Les petits postes radiotélégraphiques sont munis seulement d'un détecteur électrolytique avec un récepteur téléphonique, ou bien d'un cohéreur avec un enregistreur Morse. Dans les postes importants, on emploie simultanément ces deux détecteurs : avec l'aide du détecteur électrolytique et du téléphone, qui réalisent un récepteur d'une grande sensibilité, on effectue le réglage nécessaire pour que le poste soit parfaitement accordé sur la fréquence des ondes transmises ; ensuite, on reçoit les signaux au moyen du cohéreur et de l'enregistreur Morse. Un dispositif récemment breveté permet même d'effectuer au-

(1) Cet appareil fonctionne lorsque l'antenne présente une forte charge statique, et protège ainsi les circuits récepteurs qui lui sont reliés.

tomatiquement le remplacement du détecteur sensible par le détecteur normal lorsque l'intensité du courant oscillant engendré dans le système récepteur atteint une certaine valeur.

La figure 117 représente la disposition des circuits em-

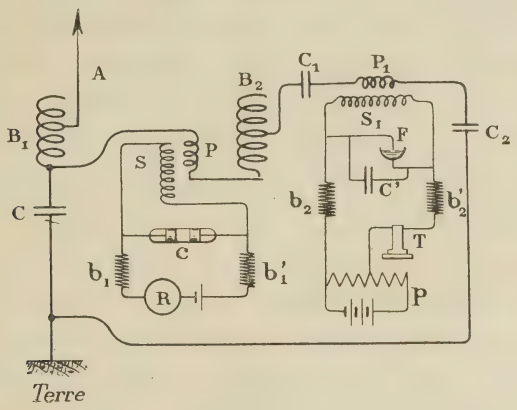


Fig. 117.

ployés pour la réception dans un poste important : l'antenne aboutit à une bobine d'accord B_1 puis à un condensateur C relié à la terre ou à la capacité équivalente. Le circuit oscillant principal $CPB_2C_1P_1C_2$ est accouplé directement à l'antenne : il contient une bobine d'accord B_2 et agit inductivement, par l'intermédiaire des transformateurs PS et P_1S_1, sur deux circuits oscillants qui contiennent l'un un cohéreur C, l'autre un détecteur électrolytique F. Le cohéreur est relié, comme d'habitude, à un circuit contenant les bobines de réactance $b_1b'_1$, un relais R et un élément de pile. Quant au détecteur électrolytique F, branché, ainsi que le condensateur C', entre les extrémités du secondaire S_1, il est relié à un circuit contenant deux bobines de réactance $b_2b'_2$, un récepteur téléphonique T, et un potentiomètre p.

Pour que les postes puissent se syntoniser le plus complètement possible et se mettre à l'abri des signaux étrangers, on emploie comme transformateur PS, relié au circuit du cohéreur, un appareil permettant de réaliser un coefficient d'accouplement variable, dont on règle à volonté la valeur. Cet appareil consiste en une bobine centrale fixe servant de pri-

maire et une bobine extérieure mobile, servant de secondaire, fixée à une charnière autour de laquelle elle peut pivoter d'un angle plus ou moins grand. On a ainsi la possibilité de faire varier le nombre de lignes de force magnétiques embrassées par le secondaire, c'est-à-dire la valeur du coefficient d'accouplement. Quand des signaux perturbateurs ou parasites viennent impressionner les appareils récepteurs, on affaiblit l'accouplement autant qu'il est nécessaire pour s'en débarrasser : on peut, paraît-il, y réussir d'une façon complète si la longueur d'onde des signaux perturbateurs diffère de 5 °/₀ de la longueur d'onde adoptée par le poste transmetteur. Même pour des longueurs d'onde identiques, on peut arriver à se débarrasser des signaux perturbateurs si le poste étranger travaille avec un amortissement différent de celui du transmetteur dont on veut recevoir les signaux. L'emploi permanent d'un ondamètre Dönitz dans les postes du système Telefunken permet d'ailleurs de mesurer très rapidement la valeur d'une longueur d'onde.

Système Marconi. — Dans les postes établis en vue de communications à des distances relativement faibles, la Cie Marconi emploie, pour la transmission, le montage de la figure 118 :

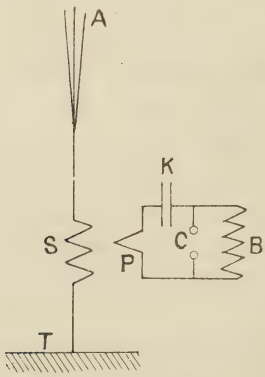


Fig. 118.

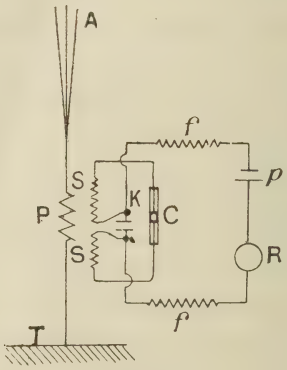


Fig. 119.

une bobine d'induction B alimente l'éclateur C qui fait partie d'un circuit oscillant formé du condensateur K et du primaire P d'un transformateur (ce primaire comprend un très petit nom-

bre de tours de fil, souvent même un seul tour). L'antenne est formée de plusieurs conducteurs aériens ; sa base est reliée à la terre, et le secondaire S du transformateur est embroché sur elle. Pour la réception, le montage employé est celui que représente la figure 119 : ce montage est semblable à ceux antérieurement décrits.

Pour les transmissions à grande distance, la Cie Marconi emploie un ou plusieurs circuits oscillants alimentés par un générateur à courant alternatif : l'un de ces montages, réalisé par M. Fleming, a déjà été décrit (fig. 106). Une autre disposition du système transmetteur est représentée par la figure 120 :

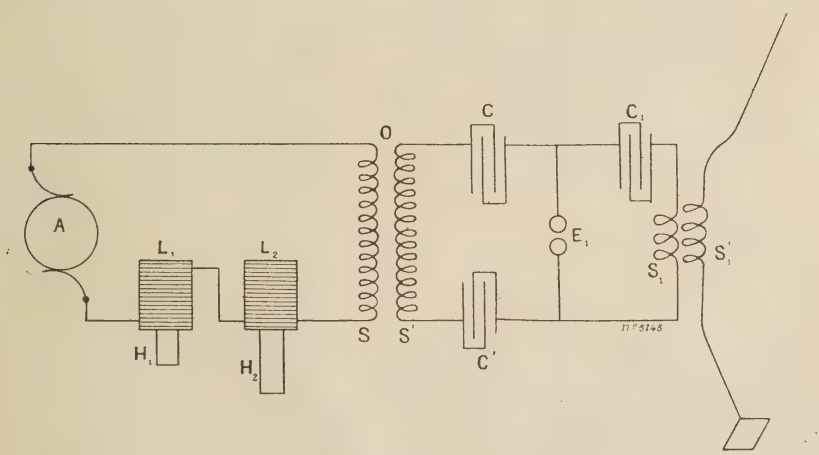


Fig. 120.

le générateur alimente le primaire S d'un transformateur : le circuit oscillant $S'CC_1S_1C'$ est en résonance avec le circuit du générateur : le circuit oscillant $C_1E_1S_1$ est en résonance avec l'antenne.

Les appareils récepteurs adoptés pour les communications à grande distance reposent sur l'emploi du détecteur magnétique Marconi, qui présente une grande sensibilité et une bonne régularité de fonctionnement.

Système Fessenden. — Les circuits transmetteurs d'un poste de la National Signalling C° (système Fessenden) sont repré-

sentés schématiquement par la figure 121. L'antenne multiple A est reliée à une bobine d'accord U, un éclateur et la terre T : elle est accouplée directement à un circuit oscillant, comprenant le secondaire S d'un transformateur dont le primaire est alimenté par un générateur à courant alternatif D. Comme on le voit, l'accouplement entre l'antenne et le circuit oscillant est un accouplement rigide, puisque la portion commune contient l'éclateur, entre les boules duquel existe une différence de potentiel élevée. Un interrupteur M, intercalé dans le circuit primaire, permet d'émettre les signaux : cet interrupteur est souvent commandé par un appareil spécial, muni d'un clavier de machine à écrire, qui provoque automatiquement l'émission des signaux Morse correspondant aux lettres du clavier qui ont été abaissées. Actuellement, l'interrupteur n'a plus pour fonction d'ouvrir et de fermer le circuit primaire, mais d'ouvrir et de fermer un tour de fil qui agit, par rapport à la bobine U, comme le secondaire d'un transformateur : suivant que ce tour de fil est fermé sur lui-même (position normale) ou ouvert (position correspondant à l'émission d'un signal), la self-induction de la bobine U a une valeur plus ou moins grande et la fréquence des oscillations produites dans l'antenne varie. Le transmetteur émet donc continuellement des ondes, mais ce n'est que quand ces ondes ont une fréquence donnée (interrupteur ouvert) que le récepteur est impressionné.

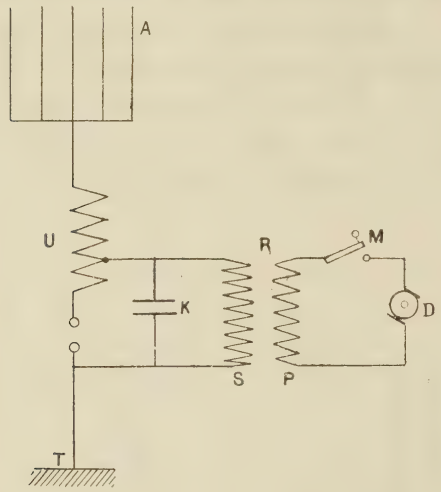


Fig. 121.

Le système employé pour la réception est représenté schématiquement par la figure 122. Le fonctionnement du dispositif PSKK'P'S' a déjà été expliqué (page 129, fig. 82). Les deux secondaires des transformateurs semblables PS et P'S'

sont connectés en opposition dans un circuit contenant le détecteur électrolytique D, sur lequel sont branchés un récepteur téléphonique E et un potentiomètre R.

Les résultats obtenus avec ce dispositif de syntonisation, récemment perfectionné par M. Fessenden, sont tels que tout

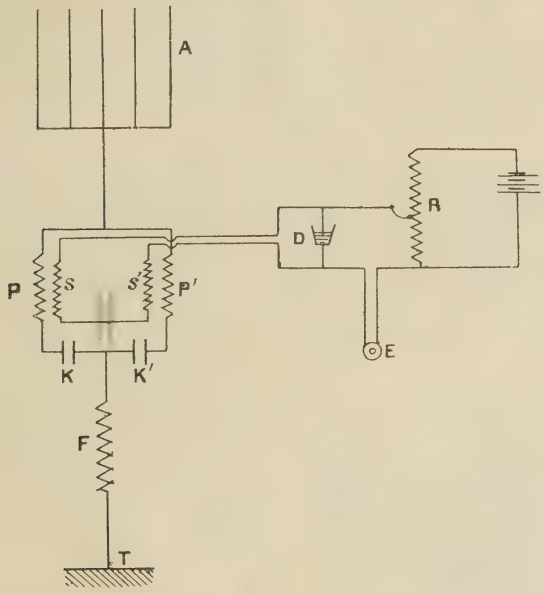


Fig. 122.

signal étranger dont la fréquence diffère de 1 °/₀ de la fréquence employée reste sans effet sur le récepteur. La modification de fréquence, produite au transmetteur par la manœuvre de l'interrupteur, est de 0,25 °/₀ environ. Avec un réglage convenable du poste récepteur, on arrive à ce que le détecteur ne soit impressionné que par les ondes émises lorsque l'interrupteur est ouvert. Les postes étrangers, qui reçoivent les ondes provenant du poste transmetteur, ont leurs appareils impressionnés d'une façon continue et ne peuvent démêler les signaux au milieu de ces trains d'ondes dont les fréquences diffèrent très peu.

Système de Forest. — La figure 123 indique le montage employé pour les transmissions. Un générateur à courant alternatif G est relié, par l'intermédiaire d'une bobine de self-in-

duction réglable B, au primaire P d'un transformateur : un interrupteur *i* est intercalé dans le circuit et sert pour l'émission des signaux. Les deux pôles de l'alternateur sont connectés à la terre par l'intermédiaire de condensateurs de capacité convenable. Si des oscillations à haute tension se produisaient dans le circuit de l'alternateur, elles trouveraient ainsi un chemin vers la terre et n'endommageraient pas le générateur. Le secondaire S du transformateur alimente un circuit oscillant contenant le condensateur C, l'éclateur E, et une portion plus ou moins grande d'une bobine B'. L'antenne multiple A est reliée, par l'intermédiaire d'un petit éclateur, à un point variable D de cette bobine B', dont l'extrémité inférieure est connectée à la terre.

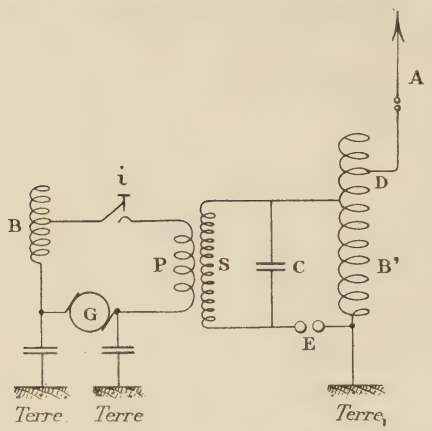


Fig. 123.

Pour la réception, l'antenne A comprend une faible portion de la bobine réglable B qui fait partie du circuit oscillant BCD, contenant le détecteur électrolytique D. Sur celui-ci est branché un récepteur téléphonique T avec le potentiomètre P (fig. 124).

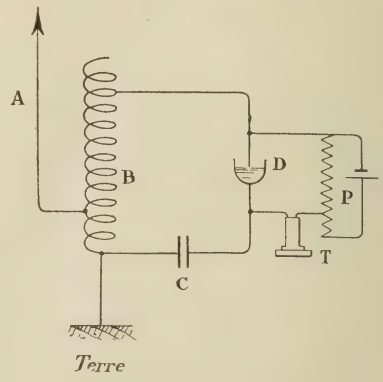


Fig. 124.

Souvent on remplace le détecteur électrolytique et le téléphone par un cohéreur de M. Maskelyne avec enregistreur Morse. Ce cohéreur est formé d'un petit cylindre d'acier légèrement oxydé, dont les extrémités coniques reposent sur deux électrodes cylindriques en acier minutieusement polies.

Description de quelques stations radiotélégraphiques de grande puissance.

Nous allons examiner très brièvement les solutions qui ont été adoptées pour l'établissement de postes radiotélégraphiques de très grande puissance destinés à assurer des communications lointaines.

Stations de Poldhu et de Wellfleet. — La compagnie Marconi a installé des postes radiotélégraphiques de grande puissance à Wellfleet et à Poldhu. Ces deux stations établies, l'une en Amérique, et l'autre sur la pointe de Cornouailles (Grande-Bretagne) ont été érigées en vue de communications transatlantiques qui n'ont pas encore pu être réalisées, malgré des efforts considérables. Chaque antenne est constituée par un très grand nombre de fils de cuivre formant une pyramide renversée que soutiennent quatre tours en bois de 65 mètres de hauteur placées au sommet d'un carré de 60 mètres de côté. La figure 125 représente schématiquement une de ces antennes. Les dispositifs employés sont ceux précédemment décrits.

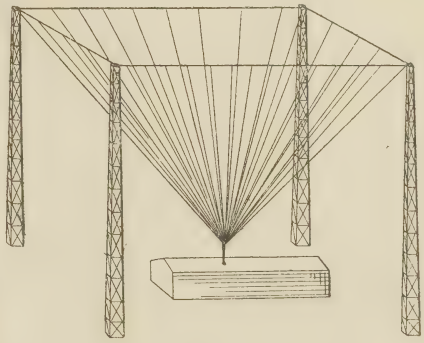


Fig. 125.

Pendant l'été 1902, après achèvement de l'installation du poste de Poldhu, M. Marconi a fait, à bord d'un cuirassé italien, le *Carlo Alberto*, des expériences de réception à grande distance. Ce navire était muni d'une antenne de 50 fils suspendus à un fil horizontal tendu entre les deux grands mâts (fig. 126) : l'antenne avait 54 mètres de hauteur. La prise de terre était constituée par la coque d'acier du bâtiment, à laquelle on avait relié l'antenne en un grand nombre de points. Le détecteur

employé était le détecteur magnétique, avec récepteur téléphonique. Le *Carlo Alberto* a pu recevoir, pendant son voyage d'Angleterre à Cronstadt et son retour de Cronstadt à la Spezzia, une partie des signaux émis par le poste de Poldhu :

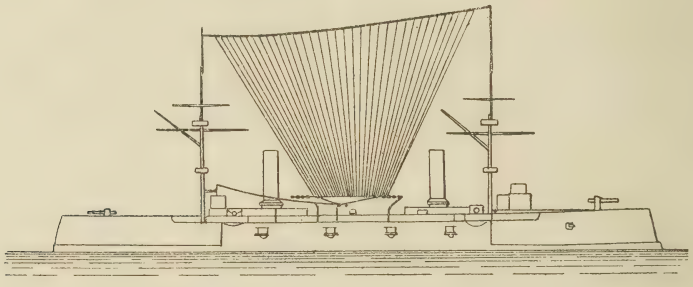


Fig. 126.

les distances auxquelles ont pu être perçus les signaux semblent avoir dépassé 1 000 kilomètres dans ces expériences.

Actuellement, les paquebots transatlantiques anglais munis d'appareils Marconi reçoivent les signaux provenant d'Angleterre ou d'Amérique pendant la première ou la deuxième partie de leur voyage : au milieu de leur trajet, ils reçoivent simultanément les signaux provenant d'Angleterre et d'Amérique si les conditions sont favorables à de bonnes communications radiotélégraphiques, ou bien ils ne perçoivent les signaux d'aucun des deux postes transmetteurs si les conditions sont défavorables.

Station de Nauen. — La Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie a établi à Nordreich et à Nauen, à l'embouchure de l'Elbe, des postes radiotélégraphiques de grande puissance. Le dernier est particulièrement intéressant au point de vue des dispositions employées.

L'antenne a la forme d'un parapluie et est supportée par une tour en fer de 100 mètres de hauteur isolée du sol : sa disposition générale est représentée par la figure 127. La tour triangulaire a quatre mètres de côté. Trois montants, assemblés par des traverses diagonales, sont parallèles entre eux depuis le haut de la tour jusqu'à six mètres du sol. Au pied de la tour,

ils se réunissent et aboutissent à une sphère de fonte logée dans un socle convenable. La fondation est en béton et repose sur une couche de matière isolante. Une plate-forme, à laquelle conduisent des escaliers, est située à 96 mètres du sol : l'antenne est hissée par trois poulies, placées à quatre mètres au-dessus de la plate-forme. Trois haubans en fer sont

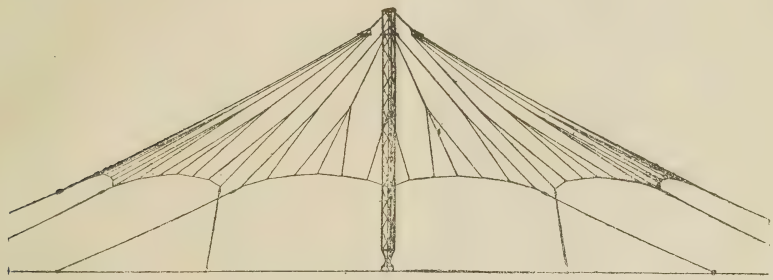


Fig. 127.

fixés à la tour à 75 mètres de hauteur : ils aboutissent à des ancrages placés à 200 mètres du pied de la tour et servent à maintenir celle-ci verticale. Ces haubans sont isolés du sol et de la tour par des pièces en bois imprégné qui, à la partie supérieure, sont plongées dans l'huile. L'antenne elle-même est constituée par un grand nombre de fils de bronze disposés en forme de parapluie et couvrant une surface de 60 000 mètres carrés. La partie supérieure comprend 54 fils sur chacun desquels se ramifient, au quart de leur longueur, deux nouveaux fils ; la partie inférieure comprend donc 162 fils. Du sommet de l'antenne partent 54 fils qui descendent parallèlement à la tour en enveloppant celle-ci. La capacité d'une telle antenne a une valeur considérable.

La prise de terre consiste en fils de fer enfouis dans le sol : ces fils rayonnent comme ceux de l'antenne ; l'ensemble comprend 108 fils qui se subdivisent en 324 fils. L'établissement de la prise de terre a absorbé 54 kilomètres de fils de fer enfouis à 0,25 centimètres de profondeur ; la surface ainsi couverte atteint 126 000 mètres carrés.

Le poste radiotélégraphique, établi dans un bâtiment construit au pied de l'antenne, contient, au rez-de-chaussée, les

appareils à basse tension et, au premier étage, les appareils à haute tension. Le montage des circuits employés pour la transmission est représenté schématiquement par la figure 128. Un

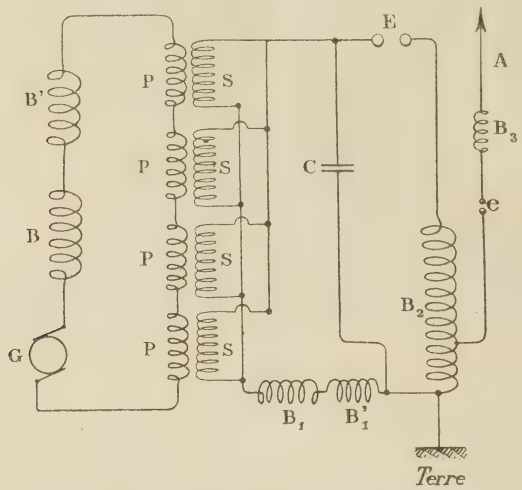


Fig. 128.

générateur à courant alternatif G alimente un circuit contenant deux bobines de self-induction BB′ et les primaires P de quatre transformateurs à haute tension. Les secondaires S de ces transformateurs sont reliés en parallèle et alimentent, par l'intermédiaire des bobines de self-induction $B_1B'_1$, le circuit oscillant ECB_2. Le condensateur C comprend 360 grandes bouteilles de Leyde et présente une capacité considérable : en réglant convenablement la self-induction des bobines $B_1B'_1$, on amène le circuit $SB_1B'_1C$ en résonance avec le circuit du générateur à courant alternatif. Quant au circuit oscillant CEB_2, comprenant l'éclateur E et la bobine réglable B_2, il est en résonance avec l'antenne branchée en un point variable de la bobine B_2. L'accouplement employé est lâche ; il a en général une valeur voisine de 0,04. L'antenne contient un petit éclateur *e* et une bobine d'accord B_3 : un conducteur, branché au-dessus de l'éclateur *e*, relie l'antenne à un parafoudre connecté à la terre. Un ondamètre permet de mesurer à chaque instant la longueur d'onde. Pour émettre les signaux, on relie le générateur tantôt aux

primaires des transformateurs (par l'intermédiaire des bobines B et B′), tantôt aux deux bobines de self-induction B et B′ seules : un commutateur spécial permet d'effectuer ces connexions.

Le montage des circuits récepteurs est le même que celui précédemment décrit (fig. 117).

Les signaux émanant de la station de Nauen sont reçus nettement à St-Pétersbourg (1 350 kilomètres). Des navires allemands ont perçu ces signaux jusqu'à 2 500 kilomètres de distance (dont 1 000 au-dessus de la terre ferme). Ces portées seront probablement dépassées dans la suite.

Stations de Brant Rock et de Machrihanish. — La National Signalling Co, qui emploie le système Fessenden, a établi près de Boston (États-Unis) et à Machrihanish (Écosse) deux postes radiotélégraphiques destinés à assurer des communications transatlantiques. La disposition des circuits transmetteurs et récepteurs est analogue à celle précédemment décrite (fig. 121 et 122), mais avec des perfectionnements importants qui sont encore se-

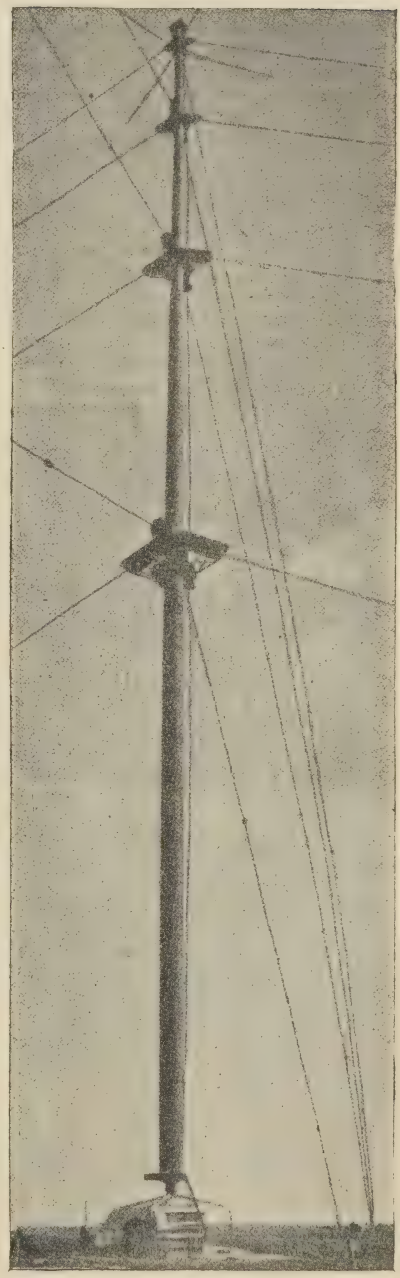


Fig. 129.

crets [1]. L'antenne est supportée par un mât creux en acier, de 120 mètres de hauteur, que représente la figure 129 : ce mât repose, par une sphère en acier, sur un support convenable noyé dans un massif de fondation et isolé du sol. Le mât est maintenu vertical par douze haubans en câbles d'acier, placés à différentes hauteurs, et solidement ancrés dans le sol dont ils sont électriquement isolés [2].

Pendant le cours de l'année 1906, des signaux ont pu être échangés entre Boston et Machrihanish (4 800 kilomètres) à travers l'océan Atlantique. Un certain nombre d'observations intéressantes ont, paraît-il, été faites aux deux postes radiotélégraphiques. Par exemple, M. Fessenden a indiqué que, certaines nuits, on recevait à Brant Rock deux groupes de signaux semblables, dont le second était en retard d'environ un cinquième de seconde sur le premier : il croit que ce second groupe de signaux arrivait au poste récepteur après avoir suivi le chemin le plus long autour de la terre. Il est impossible, à l'heure actuelle, de tirer aucune conclusion relativement à la validité de cette hypothèse.

---

(1) Le détecteur électrolytique a été remplacé par un nouveau détecteur plus sensible. Celui-ci consiste, en principe, en deux récepteurs téléphoniques comprenant chacun une bobine fixe avec noyau en fils de fer très fins et une bobine mobile collée sur un petit diaphragme en mica. Les bobines fixes sont excitées par un courant de grande fréquence (60 000 à 80 000 périodes) produit par un alternateur spécial. Les bobines mobiles sont parcourues par les oscillations électriques engendrées dans l'antenne réceptrice. Les actions qui s'exercent entre les deux systèmes de bobines, traversées par des courants de fréquences relativement peu différentes, produisent des battements qui donnent naissance à des sons musicaux.

(2) L'un de ces ancrages ayant cédé, sous l'effet d'un coup de vent, le mât du poste de Machrihanish est tombé et s'est rompu en plusieurs morceaux quelques mois après son érection.

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

CHAPITRE I. — MOUVEMENT VIBRATOIRE ET RAYONNEMENT. . . 1

Mouvement vibratoire. 1
L'éther. 4
Rayonnement. 5

CHAPITRE II. — RADIATION CHIMIQUE, LUMINEUSE, CALORIFIQUE ET ÉLECTRIQUE. 11

Rayons lumineux ; rayons chimiques et calorifiques. 12
Rayons électriques. 13
Énergie rayonnante. 14
Transmission de l'énergie par le mouvement vibratoire. 16

CHAPITRE III. — PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES, ÉLECTRODYNAMIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES. 17

Potentiel. 17
Charge électrique. 18
Condensateurs. 19
Décharge et courant électrique. 20
Champ magnétique.. 23
Induction électromagnétique. 27
Induction mutuelle et self-induction.. 29

CHAPITRE IV. — PRODUCTION ET TRANSFORMATION DU COURANT ÉLECTRIQUE. 31

Générateurs électriques.. 31
Machines dynamo-électriques. 32
Bobines de self-induction. 35
Transformateurs.. 37
Bobine de Ruhmkorff. 41

CHAPITRE V. — PRODUCTION DES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES. . 43

Circuits oscillants. 43
Oscillations amorties. 45
Oscillations entretenues. 49

Chapitre VI. — La résonance. 53

Résonance mécanique. 53
Résonance électrique. 57
Circuits accouplés inductivement.. 61
Transformateurs pour oscillations électriques. 63
Circuits accouplés directement. 64

Chapitre VII. — Production et propagation des ondes électromagnétiques. — Expériences de Hertz. 66

Excitateur ou oscillateur. 66
Résonateur. 69
Propagation des ondes électromagnétiques dans l'espace. Réflexion, réfraction et interférence. 71
Propagation des ondes électromagnétiques dans les fils. 79

Chapitre VIII. — Les débuts de la télégraphie sans fil. . 80

Radioconducteur de M. Branly.. 80
Expériences de M. Popoff. 82
Premières expériences de M. Marconi. 83
Expériences de transmission à travers la Manche (1899). 88

Chapitre IX. — Les détecteurs d'ondes. 92

Cohéreurs.. 92
Bolomètres. 98
Détecteurs thermo-électriques. 100
Détecteurs électrolytiques. 102
Détecteurs magnétiques. 105
Détecteurs à vide. 107

Chapitre X. — La syntonisation. 111

Phénomènes en jeu dans les antennes.
- *Antenne simple.* 111
- *Antenne accouplée directement avec un circuit oscillant fermé.* 114
- *Antenne accouplée par induction avec un circuit oscillant fermé.* 115

Résonance de l'antenne réceptrice. 117

Mesure des longueurs d'onde.
- *Méthode du capitaine Ferrié.* 119
- *Bobine de M. Seibt.* 120
- *Ondamètre de M. Slaby.* 122
- *Ondamètre de M. Fleming.* 122
- *Ondamètre de M. Dönitz.* 123

Dispositifs de syntonisation. 125

Chapitre XI. — Les progrès de la télégraphie sans fil. . 131

Travaux de MM. Slaby et Arco. 131
Travaux de M. Braun. 134

Travaux de MM. Lodge et Muirhead. 138
Travaux de M. Fleming. 141
Travaux de M. J.-S. Stone. 144
Travaux de M. Fessenden. 146
Travaux de M. de Forest. 147
Travaux de MM. Blondel, Ferrié, Tissot, Ducretet et Rochefort. 148
Travaux de M. Artom. 149
Travaux de M. Poulsen. 151

CHAPITRE XII. — L'ÉTAT ACTUEL DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL. . 152

Systèmes employés actuellement dans les postes radiotélégraphiques ouverts au service public.
- *Système Telefunken*.. 152
- *Système Marconi*.. 156
- *Système Fessenden*. 157
- *Système de Forest*. 158

Description de quelques stations radiotélégraphiques de grande puissance.
- *Stations de Poldhu et de Wellfleet*. . . 161
- *Station de Nauen*. 162
- *Stations de Brant Rock et de Machrihanish*.. 165

TABLE DES MATIÈRES. 167

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT

TK5742.V342
Valbreuze, R. /Notions generales sur l
74141 BSC 00195344
MIT LIBRARIES DUPL
3 9080 01930 0620

TK5742
.V342

74141

SIGN this card and present it with book
at the CIRCULATION DESK.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF
TECHNOLOGY LIBRARIES

RSC